

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

RAFAEL ARAÚJO DA SILVA

**REDUZINDO COLISÕES EM REDES LOCAIS SEM FIO
ATRAVÉS DO ALARGAMENTO DAS JANELAS DE
CONTENÇÃO POR ENCURTAMENTO DOS SLOTS
E DA DIVISÃO DE TEMPO**

CURITIBA

2017

RAFAEL ARAÚJO DA SILVA

**REDUZINDO COLISÕES EM REDES LOCAIS SEM FIO
ATRAVÉS DO ALARGAMENTO DAS JANELAS DE
CONTENÇÃO POR ENCURTAMENTO DOS SLOTS
E DA DIVISÃO DE TEMPO**

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Informática no Programa de Pós-Graduação em Informática, setor de Ciências Exatas, da Universidade Federal do Paraná.

Área de concentração: *Ciência da Computação*

Orientadora: Profa. Dra. Michele Nogueira Lima

CURITIBA

2017

S586r

Silva, Rafael Araújo da

Reduzindo colisões em redes locais sem fio através do alargamento das janelas de contenção por encurtamento dos slots e da divisão de tempo / Rafael Araújo da Silva. – Curitiba, 2017.
90 p. : il. color ; 30 cm.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Exatas, Programa de Pós-Graduação em Informática, 2017.

Orientador: Michele Nogueira Lima

Bibliografia: p. 79-86.

1. IEEE 802.11 (Normas). 2. Redes locais sem fio. 3. Sistemas de comunicação sem fio. 4. Redes de Computador – Protocolos. . I. Universidade Federal do Paraná. II. Lima, Michele Nogueira. III. Título.

CDD: 004.65



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
Setor CIÊNCIAS EXATAS
Programa de Pós-Graduação INFORMÁTICA

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em INFORMÁTICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **RAFAEL ARAÚJO DA SILVA** intitulada: **Reduzindo Colisões em Redes Locais sem Fio através do Alargamento das Janelas de Contenção por Encurtamento dos Slots e da Divisão de Tempo**, após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO.

Curitiba, 28 de Março de 2017.


MICHELE NOGUEIRA LIMA

Presidente da Banca Examinadora (UFPR)


ALDRI LUIZ DOS SANTOS

Avaliador Interno (UFPR)


JOSÉ FERREIRA DE REZENDE

Avaliador Externo (UFRJ)



*À minha filha Heloísa... Sem você
nenhuma conquista valeria a pena.*

Agradecimentos

Meus agradecimentos aos amigos e companheiros de trabalho que fizeram parte da minha formação no Grupo de Pesquisa NR2 e que certamente vão continuar presentes em minha vida. Esta pesquisa contou com importante apoio e incentivo deste grupo, o que permitiu torná-la realidade. Em especial, à Prof^a. Dr^a. Michele Nogueira Lima, agradeço pela oportunidade de participar do Programa de Pós-Graduação em Informática da UFPR e pelas orientações que possibilitaram concretizar nossos planos, direcionando cada etapa do trabalho e proporcionando contato com renomados pesquisadores da área.

Aos Professores Dr. Aldri Luiz dos Santos, Dr. Khaled Boussetta e Dr. Nadjib Achir agradeço pelo incentivo e pela valiosa contribuição, tanto na banca de qualificação quanto nas demais fases do trabalho. Também aos Professores Dr. Alberto Marcelino Efigênio Levi, Dr. Artur Ziviani e Dr. José Ferreira de Rezende, mostro minha gratidão pelo interesse e pelos *insights* fornecidos durante nossas conversas em eventos e na defesa. Todos os demais professores têm a minha gratidão por me transmitirem conhecimento e experiência de vida. A palavra *mestre* nunca fará justiça aos professores dedicados, os quais, sem nominar, terão os meus eternos agradecimentos.

À minha família agradeço pelo incentivo constante e pelo apoio incondicional que sempre me motivaram a realizar os meus projetos. Em especial à Vanessa, que esteve ao meu lado durante todo o mestrado, me levantando após cada tropeço e me dando forças para continuar. A todos vocês, muito obrigado!

Resumo

As Redes Locais Sem Fio (RLSF) são uma das principais formas de acesso à rede mundial de computadores na atualidade, presentes em praticamente todos os grandes centros urbanos. Contudo, a próxima geração de RLSF terá que prover protocolos de acesso ao meio escaláveis o suficiente para suportar a grande quantidade de dispositivos Wi-Fi esperada para os próximos cinco anos. Isto, porém, tem se mostrado um grande desafio, pois resultados de pesquisas indicam que o mecanismo atual de acesso ao meio destes dispositivos utiliza um processo de contenção ineficaz em ambientes com muitos usuários, tais como estádios e locais de eventos (redes densas). Este processo de contenção visa impedir que transmissões simultâneas, provenientes de diferentes terminais, causem interferências entre si, retendo-as em uma janela de tempo e liberando-as de forma controlada. Com isto, pretende-se aliviar a degradação do desempenho da rede causada por estas interferências. No entanto, os estudos publicados sobre o tema mostram que isto tem sido pouco eficaz à medida que a quantidade de transmissores concorrentes aumenta. Buscando uma solução para tal problema, este trabalho analisa e explora a proposta de alargamento das janelas de contenção através da redução da duração dos slots, a ser implementada pela futura emenda 802.11ax. Esta proposta tem o objetivo de mitigar as falhas de acesso ao meio, existentes no padrão atual, quando aplicado em redes densas. A mudança deve melhorar o desempenho da próxima geração de RLSF nestes cenários densos, o que é um dos objetivos da nova emenda. A análise aqui apresentada considera as diferentes classes de tráfego, ponderando as categorias de acesso para priorização de dados e suas respectivas janelas. O modelo matemático desenvolvido permite estimar as taxas de colisões de acordo com a densidade da rede. Os resultados de simulação indicam que a proposta atenua o problema das colisões inerentes ao processo de contenção e diminui a probabilidade de descartes de quadros. O estudo demonstra os benefícios que a mudança alcança em termos de aumento da taxa de transferência e redução das retransmissões e também alerta para o seu possível impacto no processo de verificação do canal. Além do mais, a pesquisa aponta formas de melhorar a proposta em estudo para o 802.11ax, através de mecanismos de divisão de tempo que potencializam os seus ganhos em desempenho. Os resultados apresentam formas de aperfeiçoamento da solução, contribuindo com a literatura e assistindo no avanço da próxima geração de RLSF.

Palavras-chave: 802.11ax, Protocolos MAC, Acesso ao Meio, Janela de Contenção.

Abstract

Wireless Local Area Networks (WLAN) are one of the main means of Internet access, present in virtually all major urban centers. However, the next generation of WLAN will have to provide medium access protocols scalable enough to support the large number of Wi-Fi devices expected over the next five years. But, this has been proven to be a major challenge. As research results state, the current medium access mechanism of these devices uses an inefficient contention process when applied in environments with many users, such as stadiums and event locations (dense networks). This process aims to prevent simultaneous transmissions from different terminals to avoid interference among them. It holds transmissions in a time window and releases them in a controlled way. Thus, this has intended to reduce the network performance degradation caused by these interferences. However, published studies on the subject show that this has been ineffective as increases the number of concurrent transmitters. Looking for a solution to this problem, this research analyzes and explores the proposal of contention windows enlargement through time slots reduction, to be implemented in the future 802.11ax amendment. The purpose of this proposal is to mitigate medium access failures, present in the current standard when it is applied in dense networks. This change must improve the performance of the next generation WLAN in these dense scenarios, which is one of the goals on the new amendment. Our analysis considers the different classes of traffic, reflecting on the access categories for data prioritization and their respective windows. A mathematical model was developed to estimate the collision rates accordingly to the network density. Simulation results indicate that the proposal reduces collisions issues inherent to the backoff procedure, and it decreases the frame loss. Our study shows the improvements achieved by this proposal as increased throughput and reduced retransmissions and also it warns to the impact on the clear channel assessment process. Further, the research points out how to improve the proposal, through time division mechanisms that potentiate their gains in performance. The results present ways of improving the solution, contributing to the literature and assisting in the advance of the next generation WLAN.

Keywords: 802.11ax, MAC Protocols, Backoff, Contention Window.

Lista de Figuras

2.1	Métodos de acesso ao meio do padrão 802.11 - adaptado de [Moraes et al., 2008]	22
2.2	Comparação dos intervalos entre quadros e janelas de contenção iniciais	23
2.3	Mecanismo de contenção atual das redes 802.11 - <i>Backoff</i>	25
2.4	Tempo do canal em transmissão bem-sucedida (T_S) e em colisão (T_C)	26
3.1	Cadeia de Markov proposta em [Bianchi, 2000] para modelar a DCF	30
3.2	Comparação dos modelos analíticos em [Gottapu et al., 2013]	31
3.3	Comparação entre os modelos analíticos e o <i>testbed</i> em [Kritzing et al., 2010]	33
3.4	Taxa de transferência agregada - ZC x CSMA/CA em [Lee e Walrand, 2008] . .	35
4.1	Alteração proposta no processo de <i>backoff</i>	43
4.2	Probabilidade de colisões conforme a densidade da rede e o tamanho da janela .	45
4.3	Probabilidade de colisões conforme a densidade da rede e a categoria do tráfego	46
4.4	Comparação entre o modelo de Bianchi (4.6) e o proposto em (4.5)	48
4.5	Relação de tempos do processamento da DCF [IEEE, 2012]	49
4.6	Estrutura dos preâmbulos em uma rajada OFDM	50
4.7	Comparação entre o BEB e o Learning-BEB [Barcelo et al., 2009]	52
4.8	CSMA/ECA configurado com quatro estações [Sanabria et al., 2014b]	53
4.9	Alternância entre modo priorizado ($EDCA^H$) e normal ($EDCA^L$) [Vesco et al., 2014]	54
5.1	Contadores utilizados por camada no simulador ns3	56
5.2	Cenário da simulação - ordenamento dos dispositivos	57
6.1	Canal saturado: taxa de colisões x densidade da rede	66
6.2	Canal não saturado: taxa de colisões x densidade da rede	66
6.3	Canal saturado: taxa de transferência x densidade da rede	67
6.4	Canal não saturado: taxa de transferência x densidade da rede	67
6.5	Quantidade de erros de transmissão x densidade da rede	68
6.6	Canal saturado: descartes por retransmissões x densidade da rede	68
6.7	Canal saturado: descartes por <i>timeout</i> x densidade da rede	69
6.8	Índice de Jain obtido nos cenários com canal saturado	70
6.9	Dados do cenário misto separados pelo tipo do nó: $9\mu s$ = base e $4,5\mu s$ = EICW	70
6.10	EICW+ - aplicação do EICW apenas para o tráfego prioritário	71
6.11	Taxa de colisões e taxa de transferência com tráfego de melhor esforço	72
6.12	Taxa de transferência de cada proposta por tipo de tráfego	73
6.13	Taxas de colisões e de transferência medidas sob influência de dispositivos legado	74
6.14	Latência e equidade das propostas sob influência de dispositivos legado	75
A.1	Dados do Experimento Original em [Sanabria et al., 2016]	87

B.1	Comparação da 802.11 DCF com o TDuCSMA	90
-----	--	----

Lista de Tabelas

2.1	Evolução do padrão IEEE 802.11	20
2.2	Modos de verificação do canal ocupado	24
2.3	Parâmetros de detecção de energia do CCA	24
2.4	Tamanho das janelas de contenção no BEB	26
3.1	Vantagens e desvantagens das soluções propostas para o problema das colisões	39
4.1	Parâmetros da janela de contenção (atual x proposto)	43
4.2	Probabilidade de colisão conforme densidade da rede e tamanho da janela . . .	47
4.3	Duração máxima de cada procedimento no intervalo de um <i>slot</i>	49
4.4	Desempenho na verificação do canal - item 19.4.7 da [IEEE, 2012]	51
5.1	Características variáveis nos cenários	58
5.2	Contadores observados nas simulações	59
5.3	Taxas e índices observados nas simulações	60
5.4	Rastreadores utilizados para coleta de dados	62

Lista de Acrônimos

AIFS	<i>Arbitration Inter-Frame Spacing</i> Espaço Arbitrário entre Quadros
ACK	<i>Acknowledgement Frame</i> Quadro de Confirmação
BEB	<i>Binary Exponential Backoff</i> Backoff Exponencial Binário
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i> Modulação por Deslocamento de Fase
BSS	<i>Basic Service Set</i> Conjunto Básico de Serviços
CCA	<i>Clear Channel Assessment</i> Verificação da Ocupação do Canal
CCK	<i>Complementary Code Keying</i> Chaveamento de Código Complementar
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i> Verificação de Redundância Cíclica
CSMA/CA	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i> Acesso Múltiplo com Verificação de Portadora e Prevenção de Colisão
CSMA/ECA	<i>Carrier Sense Multiple Access with Enhanced Collision Avoidance</i> CSMA com Prevenção Aprimorada de Colisão
DCF	<i>Distributed Coordination Function</i> Função de Coordenação Distribuída
DIFS	<i>Distributed Inter Frame Space / DCF Inter Frame Space</i> Espaço entre Quadros da Função DCF
EDCA	<i>Enhanced Distributed Channel Access</i> Acesso Aprimorado de Coordenação Distribuída
EICW	<i>Enlargement of Initial Contention Window</i> Alargamento da Janela de Contenção Inicial
EIFS	<i>Extended Interframe Space</i> Espaço entre Quadros Estendido
ERP	<i>Extended Rate PHY</i> Camada Física Estendida
GNU	<i>General Public License</i> Licença Pública Geral
HCCA	<i>HCF Controlled Channel Access</i> Acesso do Canal Controlado pela HCF
HCF	<i>Hybrid Coordination Function</i> Função de Coordenação Híbrida

IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> Instituto de Engenheiros Eletrecistas e Eletrônicos
L-BEB	<i>Learning Binary Exponential Backoff</i> Aprendizagem do Backoff Exponencial Binário
MCS	<i>Modulation and Coding Scheme</i> Esquema de Codificação e Modulação
MAC	<i>Media Access Control</i> Controle de Acesso ao Meio
MCS	<i>Modulation and Coding Scheme</i> Esquema de Codificação e Modulação
MIB	<i>Management Information Base</i> Base de Informações de Gerenciamento
MIMO	<i>Multiple-Input and Multiple-Output</i> Múltipla Entrada e Múltipla Saída
NAV	<i>Network Allocation Vector</i> Vetor de Alocação da Rede
PCF	<i>Point Coordination Function</i> Função de Coordenação Pontual
PHY	<i>Physical layer on Open Systems Interconnection Model (OSI)</i> Camada Física no Modelo de Interconexão de Sistemas Abertos
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i> Multiplexação por Divisão Ortogonal de Frequência
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i> Modulação de Amplitude em Quadratura
QoE	<i>Quality of Experience</i> Qualidade de Experiência
QoS	<i>Quality of Service</i> Qualidade de Serviço
RTS/CTS	<i>Request to Send and Clear to Send</i> Requisição de Envio e Autorização de Envio
SDR	<i>Software Defined Radio</i> Rádio Definido por Software
SIC	<i>Successive Interference Cancellation</i> Anulação Sucessiva de Interferência
SIFS	<i>Short Inter-Frame Spacing</i> Espaço Curto entre Quadros
SRB	<i>Semi-Random Backoff</i> Backoff Semi-Aleatório
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i> Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo
TGax	<i>Task Group AX</i> Grupo de Trabalho AX
TRACK	<i>Transmission Rate Adaptation for Colliding Links</i> Adaptação da Taxa de Transmissão para Conexões com Colisões
WARP	<i>Wireless Open-Access Research Platform</i> Plataforma de Pesquisa Sem Fio de Acesso Aberto
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i> Rede Local Sem Fio

Lista de Símbolos

τ	tau, probabilidade de uma estação transmitir em um slot
μs	microsegundo, unidade de tempo, usada na duração dos <i>slots</i>
mW	miliwatt, unidade de energia
dBm	decibéis, unidade logarítmica de energia
MHz	megahertz, unidade de frequência
CW_{min}	tamanho inicial ou mínimo da janela de contenção
CW_{max}	tamanho máximo da janela de contenção
W_i	maior <i>slot</i> da janela na iteração i
$b(t)$	processamento da contagem regressiva do <i>backoff</i>
$s(t)$	processamento dos estágios do <i>backoff</i>
P_s	probabilidade de uma transmissão bem-sucedida
P_c	probabilidade de uma colisão
TC	ciclo de tempo (<i>time cycle</i>)
TF	intervalo de tempo (<i>time frame</i>)
T_H^n	intervalo prioritário (<i>time high</i>)
T_C	tempo de colisão (transmissão com falha)
T_S	tempo de transmissão (comunicação bem-sucedida)

Sumário

1	Introdução	15
1.1	Motivação	16
1.2	Definição do Problema	17
1.3	Objetivos	18
1.4	Estrutura	18
2	Fundamentos	19
2.1	O padrão 802.11	19
2.2	Redes Densas	20
2.3	Protocolos de Acesso ao Meio	21
2.3.1	Processo de Verificação do Canal Ocupado	23
2.3.2	Processo de Contenção - <i>Backoff</i>	24
2.4	Colisões	25
2.4.1	<i>Backoff</i> Exponencial Binário	26
2.4.2	Tipos de Colisões	27
2.5	Resumo	27
3	Revisão bibliográfica	29
3.1	Estudos e Modelos Analíticos	29
3.1.1	O Modelo de Bianchi	29
3.1.2	Modelando Redes Densas	31
3.2	Estudos Práticos	32
3.3	Soluções para Amenizar o Problema das Colisões	33
3.3.1	Canais de Controle e Domínio de Frequência	33
3.3.2	Divisão de Tempo	34
3.3.3	Adaptação Dinâmica da Janela de Contenção	36
3.4	Redução dos <i>Slots</i>	37
3.5	Imperfeições na Verificação do Canal	38
3.6	Discussão e Perspectivas	38
3.7	Resumo	39
4	Análise e Aprimoramento do EICW	41
4.1	Visão Geral	41
4.2	Modelo da Rede	41
4.3	Descrição do EICW	42
4.3.1	Funcionamento	43
4.3.2	Estendendo o EICW	44
4.4	Análise da Redução da Probabilidade de Colisões	44
4.4.1	Modelo Matemático	44

4.4.2	Discussão	46
4.4.3	Comparação com Outros Modelos	47
4.5	Requisitos de <i>Hardware</i>	48
4.5.1	Função de Verificação do Canal	49
4.6	Questões em Aberto	51
4.7	Comparações e Extensões	52
4.7.1	Protocolo CSMA/ECA	52
4.7.2	Protocolo TDuCSMA	53
4.8	Resumo	54
5	Metodologia e Implementação	55
5.1	Ambiente da Simulação	55
5.1.1	Cenários	56
5.1.2	Métricas	58
5.2	Extensões no Simulador NS3	60
5.2.1	Detector de Colisões	60
5.2.2	Classe de Estatísticas	61
5.2.3	Parametrização do EICW	62
5.2.4	Parametrização dos Demais Protocolos	62
5.2.5	Implementação dos Cenários	63
5.3	Calibração e Validação	63
5.4	Resumo	64
6	Resultados e Discussão	65
6.1	Avaliação do EICW	65
6.1.1	Aprimorando o Protocolo EICW	70
6.2	Comparando soluções: EICW, CSMA/ECA e TDuCSMA	71
6.2.1	Avaliando a Transição	73
6.3	Resumo	75
7	Conclusão e Considerações Finais	77
7.1	Questões em Aberto	78
	Referências Bibliográficas	79
A	Protocolo CSMA/ECA	87
A.1	Validação	87
A.2	Implementação	88
B	Protocolo TDuCSMA	89
B.1	Preparação	89
B.2	Validação	90

Capítulo 1

Introdução

A demanda por redes sem fio cresce rapidamente com a grande proliferação de novos dispositivos e aplicações, tais como *smartphones*, *tablets* e aplicativos móveis. O número de aparelhos cujo principal acesso à rede é feito através de **comunicação sem fio** vem prevalecendo sobre a quantidade de aparelhos exclusivamente cabeados [Bonnington, 2015]. Fatores como custo e simplicidade levaram à popularização em escala mundial do padrão IEEE 802.11 utilizado nas WLANs, com mais de sete bilhões de equipamentos em uso [Cisco, 2014]. Entretanto, a **saturação dos canais de comunicação** destas redes tem sido observada nos grandes centros urbanos, principalmente aquelas operando na faixa livre de 2.4 GHz [Alderfer, 2013]. Isto resulta na degradação do desempenho e impacta profundamente na satisfação dos consumidores de redes sem fio, percebida através das métricas de Qualidade de Experiência (QoE) dos usuários [Laghari et al., 2011]. Portanto, são requeridas novas soluções a fim de viabilizar **redes cada vez mais densas** sem perdas de desempenho e qualidade.

A dificuldade em prover uma boa qualidade em redes sem fio está no **compartilhamento do canal**. Em meios de comunicação não guiados, tais como o ar, os sinais emitidos podem sofrer influência de diversos tipos de ruídos e perturbações provenientes de outras fontes [Perez, 1998]. Em ambientes com muitos dispositivos, há uma disputa para acessar o meio, o qual precisa ser dividido entre todos os terminais que desejam utilizá-lo. Caso aconteça alguma transmissão em paralelo na mesma faixa, haverá interferência entre elas e isto tornará ambos os sinais ilegíveis, causando descartes, desperdício de tempo e atrasos [Kumar et al., 2008]. Em consequência, os **protocolos de acesso ao meio** tornam-se fundamentais no uso do canal de comunicação. Eles são os responsáveis por verificar se o canal está disponível ou ocupado, iniciando suas transmissões apenas quando disponível e abstendo-se de transmitir enquanto ocupado [Kurose e Ross, 2010].

Em redes densas, a dificuldade em prover este acesso será maior por causa da quantidade de terminais disputando o meio. O atual mecanismo prevê uma aquisição aleatória do canal dentro de uma janela de tempo limitada [IEEE, 2012]. Com isto, a chance de uma transmissão simultânea cresce à medida que mais nós competem pelo canal [Da Silva et al., 2016a]. No sentido de melhorar este processo, a literatura tem apresentado diversas sugestões de mudanças nas camadas física e de enlace, por meio da inclusão de novos canais de comunicação ou através de mudanças no atual mecanismo de contenção [He et al., 2013]. Entretanto, as propostas que podem prover comunicação em duas vias, por múltiplos canais, exigem custos adicionais que inviabilizam sua interoperabilidade com os atuais equipamentos e introduzem novos problemas. A interferência de sinal entre as antenas transmissoras e receptoras do mesmo equipamento e, também, a dificuldade e os custos para anular esta perturbação são exemplos destes problemas [Kosek-Szott, 2012, Xie e Zhang, 2014, Afifi et al., 2016].

Na outra linha, sem a necessidade de novos canais, as sugestões de mudanças nos parâmetros de tamanho da janela de contenção têm demonstrado capacidade de reduzir ou eliminar as colisões resultantes de transmissões simultâneas problemáticas [Lee e Walrand, 2008, Barcelo et al., 2009, Adnan e Park, 2013]. Contudo, estas opções esbarram no requisito de compatibilidade com o legado e na questão do gerenciamento das redes vizinhas, nas quais não é possível garantir a cooperação [Natkaniec et al., 2013, Fang et al., 2013, Ji et al., 2014, Nishimura et al., 2015]. Sendo assim, constata-se a necessidade de aprimoramento dos protocolos de acesso utilizados nas redes do padrão IEEE 802.11, visando aperfeiçoá-los, para que proporcionem melhorias de desempenho em ambientes densos. Além do mais, mudanças neste sentido devem preservar a compatibilidade com as versões anteriores.

1.1 Motivação

Os bilhões de dispositivos instalados e operando sob o padrão IEEE 802.11 são um forte indicador de sua popularidade. Este aspecto também demonstra a dificuldade para substituir esta infraestrutura de comunicação por um novo modelo, se este for incompatível, implicando em questões econômicas, ambientais e legais, como, por exemplo, o licenciamento de frequências outorgadas para estas redes operarem ou os problemas com lixo eletrônico que uma substituição nesta escala poderia gerar [Alderfer, 2013, Bansal et al., 2016]. Com isto, as soluções para redes densas que não considerem a compatibilidade com os padrões vigentes tornam-se pouco viáveis ou inviáveis. Por conseguinte, nos últimos anos, pesquisadores da academia e da indústria têm empenhado esforços para manter a compatibilidade com o legado à medida que aperfeiçoam os atuais padrões de redes sem fio [Lansford et al., 2013, Deng et al., 2014].

O grupo de pesquisa denominado *High Efficiency Wireless LAN*, também conhecido como *Task Group AX* ou **TGax**, foi criado pelo Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE) com o objetivo de desenvolver e elaborar soluções para aumentar a taxa de transferência por dispositivo em ambientes de redes com elevada quantidade de nós [Aboul-Magd et al., 2014]. Para alcançar este objetivo, o grupo busca aperfeiçoar os instrumentos de controle das camadas físicas e de enlace das redes locais sem fio do padrão 802.11. Eles têm avaliado propostas para solucionar ou minimizar os problemas observados em redes densas e, com isto, pretendem entregar uma nova emenda ao padrão, prevista para 2019, que substituirá as atuais emendas 11n e 11ac, acrescentando os quesitos esperados para a próxima geração de redes Wi-Fi [Deng et al., 2014].

Em consonância com esta abordagem, este trabalho avalia as principais propostas da literatura de mudanças no mecanismo de acesso ao meio utilizado nas redes 802.11 e, também, propõe soluções de suporte a redes mais densas que consideram os requisitos de compatibilidade e coexistência com os dispositivos legados em uso. Uma das propostas submetidas ao TGax sugere **reduzir a duração dos slots das janelas de contenção** do atual processo de *backoff* e, concomitantemente, **aumentar a quantidade de slots**, mantendo as janelas com a mesma duração total, porém com mais opções de intervalos. Com isto, pretende-se reduzir a probabilidade de mais de um equipamento iniciar sua transmissão no mesmo *slot* e, paralelamente, aspira-se também garantir a compatibilidade com o legado [Hiertz et al., 2015]. A ideia foi apresentada ao grupo de trabalho TGax e, após votação, foi selecionada para avaliação. Entretanto, esta solução ainda não foi analisada seguindo o rigor da metodologia científica.

Este trabalho contribui com a literatura provendo resultados de um rigoroso estudo da referida proposta, os quais oferecem direcionamentos importantes relacionados à redução das colisões e ao aumento da taxa de transferência. O foco das análises está na coexistência entre os padrões, atual e proposto, procurando antever as consequências das mudanças sugeridas. Busca-se também identificar oportunidades para integrar outras soluções voltadas para redes

densas, que a princípio não são compatíveis com o legado, mas que fornecem ganhos em desempenho quando comparadas ao atual padrão. Para tal, investigam-se formas de adaptar estas soluções nos novos intervalos de *slots* indicados para o 802.11ax. Com isto, subsidia-se a evolução das redes locais sem fio no que diz respeito a atender ao aumento de demanda.

1.2 Definição do Problema

Em redes pouco saturadas, o mecanismo de acesso ao meio adotado pelo padrão 802.11 tem apresentado a capacidade de suportar as altas taxas de transferência adicionadas nas suas versões mais recentes [Chang et al., 2012]. Seu funcionamento é simples: quando percebem o canal disponível, as estações sorteiam um intervalo de tempo em *slots*. Este intervalo determina o quanto as estações devem esperar antes de iniciarem as suas transmissões. Aquela estação que conseguir o menor intervalo iniciará primeiro e todas as demais se absterão de transmitir enquanto o canal estiver ocupado. Esta contenção evita que todas as estações tentem acessar o canal ao mesmo tempo tão logo esteja livre. Porém, caso este sorteio resulte em um empate haverá uma transmissão simultânea, denominada colisão, com uma grande possibilidade de perda de ambos os quadros transmitidos.

A probabilidade de ocorrer uma colisão é inversamente proporcional à quantidade de *slots* que as estações têm para escolher nas janelas de contenção, e diretamente proporcional ao número de estações competindo pelo acesso ao canal [Da Silva et al., 2016a]. Caso haja uma colisão, esta janela de tempo é aumentada de forma exponencial, reduzindo a possibilidade de uma nova colisão na próxima tentativa, até que a janela atinja o seu tamanho máximo. Porém, o desperdício do tempo do canal acontece em toda colisão, com impacto no desempenho, principalmente se as transmissões enviarem quadros grandes. A cada transmissão bem-sucedida, o tamanho da janela retorna ao valor inicial, elevando novamente a probabilidade de colisões, independentemente do número de nós ou dos resultados anteriores. Há ainda outros tipos de colisões, produzidas por interferências externas ou pela presença de terminais ocultos, que iniciam suas transmissões porque não conseguem perceber o canal ocupado. Estas anomalias demandam outros tipos de solução que não são objeto deste estudo.

Focando apenas nas colisões normais e inerentes ao funcionamento do protocolo de acesso, o impacto deste empecilho é mais significativo à medida que a quantidade de dispositivos aumenta. Com efeito, o problema será mais relevante em **redes densas**. Isto advém de uma janela inicial muito pequena para comportar o montante de aparelhos que demandam acesso ao meio [Gottapu et al., 2013]. As versões atuais do padrão 802.11 determinam uma janela inicial com apenas dezesseis intervalos, o que terá uma grande chance de empate em um sorteio com dez ou mais terminais competindo pelo acesso. No caso de tráfego priorizado de vídeo e voz (EDCA), esta janela é reduzida para oito e quatro intervalos, respectivamente. Isto aumenta ainda mais a chance de falhas se muitos equipamentos utilizarem estes serviços. Neste caso, haverá uma probabilidade de colisões acima de 50% em uma rede com apenas cinco estações transmitindo quadros de voz no mesmo canal [Da Silva et al., 2016a]. Portanto, provavelmente haverá descartes, o que impacta fortemente na percepção de qualidade e na satisfação dos usuários destas redes.

Contudo, conjuntos com dezenas ou centenas de dispositivos operando em um único ponto de acesso podem ser encontrados com facilidade. Locais públicos como estádios, estações de trem, aeroportos, escritórios corporativos, ambientes acadêmicos e outros com grande aglomeração de pessoas têm uma alta probabilidade de conterem esta quantidade de usuários em seus *hotspots* de acessos Wi-Fi. Além do mais, considerando que redes próximas operando na mesma faixa de frequência dividem o mesmo espaço, redes vizinhas com pontos de acesso

diferentes podem formar agrupamentos de muitos dispositivos operando no mesmo canal, situação comum em condomínios de prédios residenciais e comerciais. Sendo assim, as próximas gerações de redes sem fio devem considerar melhorias que permitam atender esta quantidade de usuários e dispositivos [Deng et al., 2014].

1.3 Objetivos

O principal objetivo desta pesquisa é analisar a proposta de mudança dos parâmetros do protocolo de acesso, apresentada em [Hiertz et al., 2015], referente ao **alargamento das janelas de contenção através da redução da duração dos slots**. O trabalho empenha-se em confirmar ou refutar os ganhos previstos e quantificar as suas vantagens e desvantagens. Mediante análises matemática e experimental e através de comparações com outras propostas em estudo no âmbito do TGax, busca-se medir e distinguir as contribuições de cada alteração sugerida ao protocolo. Além disso, o estudo identifica oportunidades de melhoria e propõe soluções que combinam outros mecanismos ao protocolo sugerido, potencializando os seus ganhos. Com isto, contribui-se para um avanço no desempenho das próximas gerações de redes locais sem fio.

1.4 Estrutura

Esta dissertação de mestrado está organizada em sete capítulos. O Capítulo 2 apresenta os fundamentos necessários para sua compreensão, com detalhes sobre o contexto em que se aplica, sobre os mecanismos que propõe alterar e sobre os problemas que pretende mitigar. O Capítulo 3 apresenta trabalhos da literatura com o objetivo de resolver ou aliviar o problema das colisões e também os modelos tradicionalmente usados para análise do mecanismo. O Capítulo 4 descreve a proposta em detalhes, apresentando um novo modelo para analisar o impacto das colisões conforme a densidade da rede. O Capítulo 5 narra como as soluções foram avaliadas. Em seguida, o Capítulo 6 apresenta os resultados da análise e compara a proposta inicial com os outros protocolos de acesso sugeridos para o 802.11ax. Além do mais, explorando as diferentes ideias em uma saída conjunta, propõe-se aprimorar a solução, visando ampliar o seu desempenho. Por fim, o Capítulo 7 encerra com as conclusões obtidas no estudo e as questões que ficaram em aberto, apontando oportunidades para futuras pesquisas.

Capítulo 2

Fundamentos

Este capítulo apresenta uma descrição sucinta do padrão 802.11, focando nos mecanismos e nas estruturas relevantes para o entendimento das soluções propostas. Após uma contextualização, o texto aborda princípios pertinentes às redes densas e expõe minúcias do atual protocolo de acesso ao meio. O conteúdo discorre sobre a evolução do padrão e as diferentes abordagens utilizadas em seu mecanismo de acesso, bem como pelo detalhamento dos seus processos. Há, também, uma revisão de conceitos fundamentais para a compreensão do problema das colisões, que é mais significativo nestas redes.

2.1 O padrão 802.11

Nas redes locais sem fio, o IEEE 802.11 tornou-se *de fato* um padrão mundial de conectividade para este tipo de rede. Nas últimas duas décadas, equipamentos operando neste padrão proliferaram-se como o principal meio de acesso à Internet para dispositivos móveis [Deng et al., 2014]. O padrão descreve as especificações das camadas físicas (PHY) e de enlace (MAC) de dispositivos fixos ou móveis para conectividade sem fio em uma mesma localidade. Desde a sua primeira versão, em 1990, diversas emendas têm sido adicionadas pelos grupos de trabalho responsáveis pela sua revisão. As principais mudanças, relacionadas na Tabela 2.1, foram mantidas nas versões posteriores, sendo que a atual versão 802.11ac é compatível tanto com a versão 802.11n quanto com a 802.11a [Deng et al., 2014] e as próximas versões devem continuar suportando e coexistindo com as versões anteriores [Chun et al., 2013].

A Wi-Fi Alliance, associação sem fins lucrativos de empresas fabricantes de produtos de rede sem fio, realiza a certificação de equipamentos baseados no padrão IEEE 802.11 [Figuerola e Paolini, 2006]. E o Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos mantém grupos de trabalho formados por pesquisadores de empresas, governos e da academia com o objetivo de resolver problemas e promover melhorias ao padrão. Entre estes, atualmente há sete grupos desenvolvendo futuras emendas [Stephens, 2016]. Os grupos TGah, TGaj, TGay e TGak trabalham em mudanças para a inclusão de faixas de frequência, tais como as faixas abaixo de 1 GHz voltadas para equipamentos sensíveis ao consumo de energia ou as faixas de 57-66 GHz, que devem permitir taxas de transferência acima de 1 Gbps. Os grupos TGai e TGay atuam no problema de associação, transferência e descoberta de redes. E o TGax atua no desenvolvimento de soluções para os problemas das redes densas.

Tabela 2.1: Evolução do padrão IEEE 802.11

Emenda	Principais mudanças
802.11a (1999)	OFDM na faixa de frequência de 5 GHz com transmissões até 54 Mb/s
802.11b (1999)	HR/DSSS na faixa de frequência de 2,4 GHz com transmissões até 11 Mb/s
802.11c (2001)	Operações de comutação ou <i>bridging</i> para pontos de acesso
802.11f (2003)	Protocolo IAPP para associações com os pontos de acesso
802.11g (2003)	Transmissões na faixa de frequência de 2,4 GHz com até 54 Mb/s
802.11i (2004)	Melhora os mecanismos de autenticação para corrigir falhas de segurança dos protocolos anteriores
802.11e (2005)	Define recursos para configurar QoS através de modificações na camada de enlace
802.11-2007	Consolida as emendas 802.11 em um padrão base
802.11r (2008)	Altera o mecanismo de <i>handoff</i> para trocas rápidas e seguras das estações entre os pontos de acesso
802.11n (2009)	Transmissões simultâneas para até quatro clientes através da tecnologia MIMO
802.11ac (2012)	Transmissões simultâneas com até oito antenas e modulações de maior densidade até 256-QAM
802.11-2012	Consolida as emendas 802.11 em um padrão base

2.2 Redes Densas

Em geral, redes densas são aquelas cujo número de conexões de cada nó está próximo do número máximo de nós, com cada nó conectando-se diretamente com todos ou quase todos os demais nós da rede, formando uma rede completamente conectada [Scholz, 2015]. Entretanto, o conceito de redes densas varia conforme as circunstâncias e requer definições mais rigorosas. No caso das redes sem fio do padrão 802.11, as conexões são feitas por radiodifusão e todos os dispositivos dentro do alcance da rede local conectam-se potencialmente entre si, pois os sinais devem ser percebidos e tratados, mesmo que sejam destinados a outros nós, cabendo a cada dispositivo ajustar seus vetores de alocação da rede, independentemente da quantidade de nós. Por causa disto, a **densidade demográfica ou populacional** é o indicador mais adequado para demonstrar a densidade das redes locais sem fio, tendo sido utilizado neste estudo. Esta métrica é obtida através da quantidade de nós dentro do espaço de cobertura da rede.

Contudo, alguns parâmetros de configuração interferem na definição da área de cobertura das redes sem fio. Fatores que variam em cada dispositivo podem ampliar ou reduzir este espaço, tais como: a regulação da força de transmissão, a modulação utilizada ou a quantidade de canais. E a diversidade de dispositivos com diferentes alcances cria dificuldades para medir a densidade de uma rede sem fio em um ambiente real. Além do mais, redes vizinhas operando com os

mesmos canais ou em canais adjacentes interferem umas nas outras e agem como se estivessem em uma única rede, aumentando desta forma a sua densidade populacional [Jamil et al., 2014]. No âmbito do TGax, o conceito de redes densas tem sido baseado na quantidade de usuários ou dispositivos, em torno de 1 dispositivo por metro quadrado, e na quantidade de pontos de acesso necessária para atender este volume de usuários, em torno de 1 ponto de acesso a cada 5-10 metros [Merlin et al., 2014, Bellalta, 2016].

Entretanto, uma vez que os canais de transmissão são compartilhados, assegurar apenas a conectividade do maior número possível de dispositivos não garante que estes usuários possam usufruir do canal por tempo suficiente para realizar suas transmissões com qualidade. Por causa disto, a distribuição destes limitados recursos passa a ser um fator-chave para prover qualidade nas redes sem fio densas. Logo, as pesquisas sobre o tema têm focado em soluções para aumentar a eficiência dos canais ou alternar entre eles, buscando os menos congestionados. Com isto, pretendem obter melhores taxas de transferência por dispositivo e tornar mais eficaz o uso do espectro, sendo estes os principais objetivos do grupo de trabalho TGax [Shao et al., 2013].

Neste contexto, há várias propostas de mudança na camada física do padrão 802.11. A divisão das bandas de frequência em múltiplos subcanais é uma destas promissoras propostas e, desta forma, as estações podem utilizá-los em transmissões simultâneas. Além disto, também há moções para gerenciar a sobreposição de redes vizinhas, entre outras, incluindo identificadores do BSS no sinal ou regulando seu alcance. Todavia, para que estas propostas tornem-se viáveis, os mecanismos de acesso ao meio precisam ser adaptados às novas exigências, como, por exemplo, através da inclusão de controles para diferenciar os sinais de cada rede e das redes vizinhas. Ademais, as soluções devem ser otimizadas entre as camadas, para que as informações obtidas na camada física possam ser utilizadas pelo mecanismo de acesso na camada de enlace [Deng et al., 2014]. Neste sentido, propostas de mudança na camada de enlace têm ganhado relevância, incluindo a ideia de alargamento das janelas de contenção que é objeto deste estudo.

2.3 Protocolos de Acesso ao Meio

Como descrito na Seção 2.1, as emendas do padrão 802.11 seguem uma tendência evolutiva quanto à introdução de mudanças. Esta conduta também pode ser vista nos seus protocolos de acesso ao meio da camada de enlace, sem alterações significativas entre uma emenda e a próxima. Todas as versões seguem a abordagem “escute antes de falar” em que os intervalos entre as transmissões são importantes componentes no processo de coordenação de acesso, responsável pela divisão do meio entre as estações da rede. As últimas emendas inseriram mecanismos para troca dinâmica de canais e também para a sua alocação sob demanda, a cada quadro, atendendo tanto aos dispositivos que estão conectados na rede elétrica e requerem altas taxas de transferência, obtidas com múltiplos canais, quanto aos dispositivos em que a duração da bateria é primordial e que utilizam apenas um canal [Gast, 2013]. Entretanto, independentemente da quantidade de canais, o método básico de aquisição de cada canal tem sido mantido desde sua concepção na primeira versão do padrão 802.11.

Em qualquer rede sem fio, o compartilhamento do canal é um tema desafiador. Como o meio de transmissão é uma via de mão única, acessos simultâneos precisam ser evitados. As transmissões concorrentes interferem umas nas outras e acabam por tornar ambos os sinais ilegíveis, inviabilizando a comunicação. O padrão 802.11 contém três abordagens para controlar este acesso: a *função de coordenação distribuída* (DCF), a *função de coordenação pontual* (PCF) e a *função de coordenação híbrida* (HCF). A Figura 2.1 ilustra o posicionamento destas abordagens na estrutura da camada de controle de acesso ao meio.

A DCF é utilizada tanto em redes infraestruturadas quanto em redes *ad hoc*, tendo como base o método de acesso CSMA/CA seguindo o protocolo “escute antes de falar”, que tem o objetivo de evitar colisões. Seu funcionamento consiste na contenção do tráfego durante um intervalo de tempo aleatório, evitando que todas as estações iniciem as suas transmissões simultaneamente tão logo o meio esteja disponível. Em face de sua importância, a Seção 2.3.2 aborda com detalhes a forma que esta função controla o início das transmissões. Por ora, é importante perceber que as demais abordagens apoiam-se na DCF e a sua implementação é mandatória para qualquer tipo de estação ou ponto de acesso.

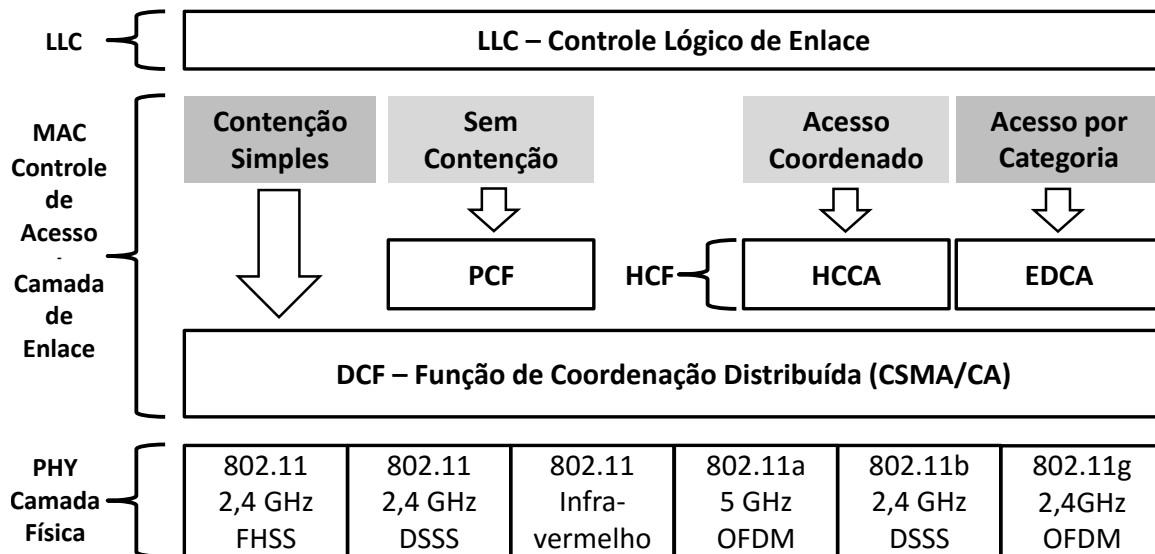


Figura 2.1: Métodos de acesso ao meio do padrão 802.11 - adaptado de [Moraes et al., 2008]

Por outro lado, a implementação da PCF é opcional e não é extensiva, sendo dispensada nos processos de certificação de equipamentos habitualmente realizados pela indústria [Fall e Stevens, 2011]. Este método utiliza a coordenação dos pontos de acesso, que são priorizados e definem quais estações podem iniciar as suas transmissões em cada intervalo. Por sua vez, as estações seguem o protocolo CSMA/CA, exceto quando o coordenador sinaliza que alguma delas pode transmitir sem contenção. Neste caso, a estação pode iniciar sua transmissão imediatamente, dentro do menor intervalo permitido, uma vez que o canal lhe foi alocado. Entretanto, o PCF apresenta problemas de atrasos já extensivamente estudados, além de limitações na quantidade de usuários e de sobrecarga em redes densas [Sikdar, 2007]. Por estes motivos, esta abordagem não foi considerada no escopo desta pesquisa.

A HCF foi introduzida a partir da emenda 802.11e, para adicionar suporte à QoS, permanecendo até as versões vigentes. Na HCF, há dois modos de operação que podem atuar em conjunto: o *acesso controlado do canal* (HCCA) e o *acesso aprimorado DCF do canal* (EDCA). O HCCA é similar à PCF quanto ao uso de um coordenador, localizado no ponto de acesso, para reservar o canal e impedir que outras estações interfiram nas transmissões, que são alocadas e concedidas pelo coordenador. E o EDCA utiliza uma classificação de tráfego definida pelo usuário para separá-lo em categorias e priorizá-lo, inserindo mudanças nos parâmetros da DCF para que o tráfego prioritário seja favorecido no acesso ao meio [Fall e Stevens, 2011]. A Figura 2.2 explica a alteração dos parâmetros das janelas de contenção da DCF pelo EDCA. Esta mudança reduz os intervalos de espera no acesso ao meio do tráfego prioritário e aumenta-os quando não é prioritário, proporcionando alguma priorização. Entretanto, como detalhar-se-á nas próximas seções, tal modificação impacta na probabilidade de colisões. Mesmo assim, até

o momento, o EDCA é o modo *default* especificado no padrão 802.11ax [Merlin et al., 2014], sendo também o mais aplicado nas configurações de redes que exigem QoS. Diante disso, este estudo focou-se nos métodos baseados em contenção, tanto DCF quanto EDCA, desta forma limitando o seu escopo.

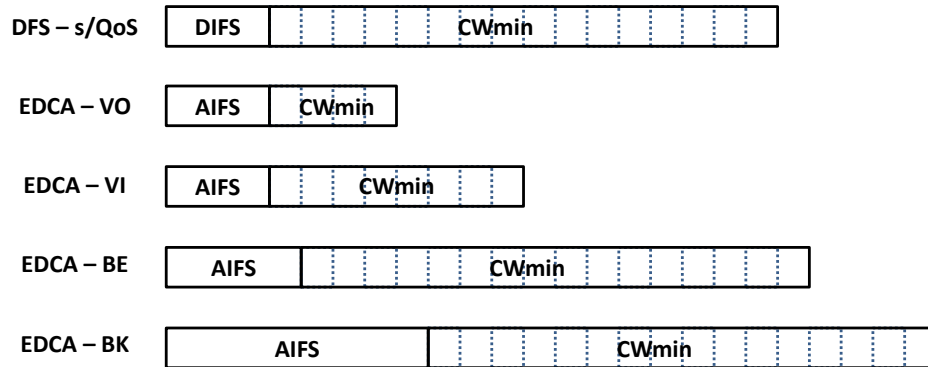


Figura 2.2: Comparação dos intervalos entre quadros e janelas de contenção iniciais

2.3.1 Processo de Verificação do Canal Ocupado

O protocolo “escute antes de falar” é vital para a correta operação do acesso ao meio do 802.11, determinando se o meio está disponível ou ocupado antes de iniciar qualquer transmissão. Os dispositivos processam a função de *verificação de canal ocupado* (CCA) e sua transmissão pode ser efetuada somente se esta função mostrar que o canal está disponível. De acordo com as regras do padrão 802.11, os dispositivos devem se abster de transmitir enquanto o canal estiver ocupado. Estas regras também definem os parâmetros que determinam se o canal está ocupado ou livre, sendo tipicamente baseadas na força do sinal recebido.

Os dispositivos podem usar dois processos distintos para perceber o canal ocupado: o primeiro apenas mede a energia localizada no meio físico e o outro requer a detecção de um determinado sinal. Estes métodos ainda podem ser combinados conforme descrito na Tabela 2.2. Em ambos os casos, as medições da força do sinal, quando acima de determinados parâmetros, indicam que o meio está ocupado. Sendo que, no modo de *detecção de energia* (ED), o parâmetro limite para estabelecer se um canal está disponível ou ocupado depende da força de transmissão do dispositivo conforme descrito na Tabela 2.3. Quanto mais longe o dispositivo consegue transmitir o seu sinal, mais fraco pode ser o sinal que será capaz de perceber e responder. Da mesma forma, se o dispositivo tem um sinal forte o bastante para afetar uma área de propagação maior, ele deve abster-se de transmitir ao perceber sinais mais fracos, presumidamente provenientes de transmissores mais distantes. Isto limita a área de interferência entre os dispositivos.

A verificação do canal ocupado (ou disponível) é realizada na forma descrita acima e, também, em uma forma virtual. Nesta última, o mecanismo calcula o montante de tempo em que o canal ficará ocupado e interrompe a escuta durante este período, assumindo que o canal ficará ocupado durante todo este tempo. Ou seja, se o mecanismo escuta o meio físico e consegue fazer a leitura do sinal de qualquer transmissão no canal (modo CCA > 1), então obtém a sua duração através do cabeçalho do quadro transmitido e registra o canal como ocupado durante este período, mantendo-o assim pelo tempo necessário para o envio deste quadro, acrescido de um tempo adicional destinado ao *quadro de confirmação* (ACK) que é enviado pelo receptor. E, caso o mecanismo verifique que o canal foi reservado por algum dispositivo, o que pode ser feito através de quadros de *requisição e confirmação de envio* (RTS/CTS), registra o canal como ocupado

Tabela 2.2: Modos de verificação do canal ocupado

Modo	Definição	Descrição
CCA 1	$ED > \text{limite}$	Considera apenas a energia detectada (ED) no canal. Retorna ocupado se qualquer tipo de energia detectada no meio está acima do limite.
CCA 2	somente CS	Considera apenas o sinal da portadora (CS) mesmo que esteja acima ou abaixo do limite de ED. Retorna ocupado se detectou o sinal.
CCA 3	CS + $ED > \text{limite}$	Combina os modos 1 e 2. Considera o CS, mas retorna ocupado somente se este sinal estiver acima do limite de ED.
CCA 4	CS + tempo	Dentro de um intervalo de tempo de 3,65ms retorna ocupado se detecta o sinal da portadora. Usado apenas para modulação High Rate PHY.
CCA 5	CS + tempo + $ED > \text{limite}$	Combina os modo 1 e 4. Usado apenas para modulação High Rate PHY.

Tabela 2.3: Parâmetros de detecção de energia do CCA

Força de Transmissão (TX power)	Limite ED
$TXpower > 100mW$	-80 dBm
$100mW \geq TXpower > 50mW$	-76 dBm
$50mW \geq TXpower$	-70 dBm

pelo intervalo de tempo requisitado. Este intervalo considera o tamanho dos quadros, a taxa de transmissão, o tamanho dos quadros de controle e os períodos entre os quadros. O registro é feito através de um contador local denominado *vetor de alocação da rede* (NAV), mantido em unidades de tempo e decrementado conforme o relógio interno, considerando o canal ocupado enquanto seu valor é diferente de zero. Por fim, quando o NAV é igual a zero, então o dispositivo volta a processar a forma física do CCA nos intervalos entre quadros, antes de iniciar suas transmissões, conforme descrito no processo de contenção ou *backoff*.

2.3.2 Processo de Contenção - *Backoff*

Como muitas estações podem estar simultaneamente aguardando o canal livre, para evitar que todas iniciem suas transmissões ao mesmo tempo tão logo o meio esteja disponível, aplica-se um processo complementar de espera, onde cada terminal aguarda um intervalo adicional e aleatório de tempo antes de iniciar sua transmissão. Com isto, o terminal que obtém o menor intervalo inicia sua transmissão, e os demais, percebendo o canal ocupado, abstêm-se de transmitir até uma próxima oportunidade. Este intervalo adicional é denominado tempo de *backoff*, sendo obtido pelo produto de um número randômico com a duração de um *slot*. O número é sorteado em uma distribuição uniforme no intervalo $[0, CW]$, onde CW é o tamanho da *janela de contenção*. E a duração do *slot* depende de parâmetros da camada física, mas em geral corresponde a poucos microssegundos. A contagem do *backoff* é iniciada após o intervalo entre quadros da função DCF (DIFS/AIFS), possibilitando que os quadros de controle

do protocolo possam iniciar antes, em intervalos menores (SIFS/PIFS), conforme ilustrado na Figura 2.3, que representa a linha de tempo do processo.

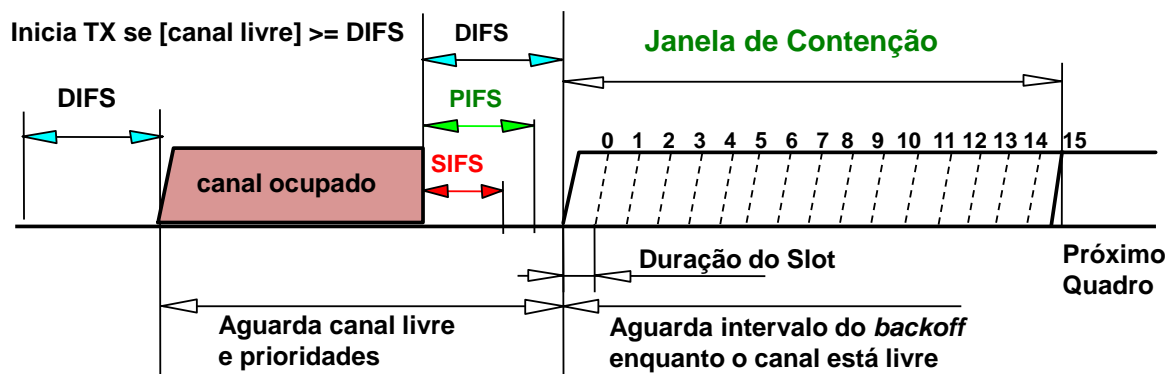


Figura 2.3: Mecanismo de contenção atual das redes 802.11 - *Backoff*

Antes de cada *slot*, os terminais verificam o canal através da função CCA e, enquanto o meio estiver disponível, o contador do *backoff* é decrementado até que atinja o valor zero. Neste caso, o terminal inicia sua transmissão no próximo *slot*. Entretanto, se outro terminal chega antes ao final da sua contagem e inicia uma transmissão, o meio torna-se ocupado e a contagem do *backoff* é interrompida. E, na próxima oportunidade, quando o meio voltar a ter disponibilidade, uma nova contenção é iniciada e sua contagem é retomada de onde parou. Isto garante que estações que obtiveram valores ruins no sorteio do *backoff* passem a ter uma chance maior de obter o canal nas oportunidades subsequentes. Este processo evita transmissões simultâneas caso todos os terminais obtenham números diferentes no sorteio, porém não garante números independentes para cada terminal. Portanto, como a inicialização do contador é resultado de um número aleatório, existe uma chance de dois ou mais dispositivos terminarem sua contagem simultaneamente e enviarem seus sinais ao mesmo tempo.

2.4 Colisões

Os sinais transmitidos ao mesmo tempo e dentro da mesma faixa de frequência tornam-se ilegíveis. Este encontro de sinais é denominado **colisão** e a área de alcance das transmissões de um grupo de equipamentos operando no mesmo canal é denominada **domínio de colisão**. O impacto das colisões é sentido diretamente na eficiência do canal, pois o tempo que seria usado para transmissão do quadro é totalmente desperdiçado conforme ilustrado na Figura 2.4. Isto ocorre porque o mecanismo não consegue perceber as colisões antes do final da transmissão, fazendo com que todo este intervalo de tempo seja perdido, tanto o destinado ao envio do quadro quanto o de sua confirmação. Por consequência, havendo colisões, as taxas de transferência são reduzidas e a latência aumenta, com descartes de dados caso os limites de retransmissões ou de atrasos sejam atingidos.

O *quadro de confirmação* é o mecanismo utilizado pelo 802.11 para detectar colisões. O padrão determina o envio de um ACK após o recebimento de cada quadro de dados. Esta confirmação tem prioridade sobre os demais quadros e é enviada apenas pela estação destinatária do quadro de dados, portanto, está livre de colisões. O dispositivo que envia um quadro de dados aguarda a confirmação e, através dela, constata que o envio foi bem-sucedido ou falhou. Caso não receba a confirmação no período pré-estabelecido, o dispositivo transmissor presume que houve uma colisão e, ciente deste fato, altera o processo de contenção antes de efetuar uma

nova tentativa de envio do mesmo quadro de dados. Esta mudança busca evitar outra colisão na próxima tentativa. Este processo é chamado de *Backoff* Exponencial Binário ou BEB.

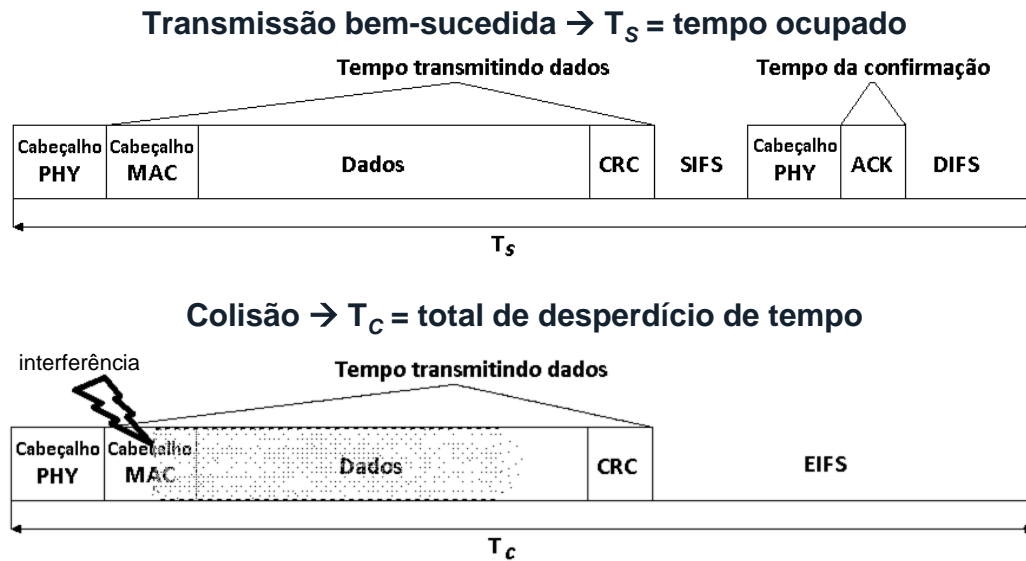


Figura 2.4: Tempo do canal em transmissão bem-sucedida (T_s) e em colisão (T_c)

2.4.1 *Backoff* Exponencial Binário

Visando reduzir a chance de uma nova colisão nas retransmissões, o processo de *backoff* dobra o tamanho da janela de contenção a cada colisão. Com isto, diminui a possibilidade de que novas contagens de *backoff* terminem simultaneamente e, por consequência, reduz-se a probabilidade de uma nova colisão. A Seção 4.4 examina com detalhes a probabilidade de colisões conforme o tamanho das janelas de contenção, mas intuitivamente pode-se antever que janelas maiores contam com menor probabilidade de transmissões simultâneas. Isto ocorre porque, quanto maiores são as opções de escolha, menores são as chances de dois ou mais dispositivos escolherem o mesmo intervalo e finalizarem sua contagem no mesmo instante. Contudo, janelas maiores reduzem o aproveitamento do canal por inserirem intervalos de espera que podem acabar em desperdício. Sendo assim, o padrão 802.11 determina um tamanho inicial e um tamanho máximo para estas janelas, baseado no tipo de tráfego que se deseja enviar. A Tabela 2.4 mostra a quantidade de *slots* que define e limita o tamanho das janelas, de acordo com cada tipo de tráfego. Após cada iteração com falha, o tamanho da janela dobra até que atinja o valor máximo e retorna ao valor inicial após uma transmissão bem-sucedida [IEEE, 2012].

Tabela 2.4: Tamanho das janelas de contenção no BEB

Tipo de Tráfego	Categoria	Janela Inicial	Janela Máxima
Voz	AC_VO	4	8
Vídeo	AC_VI	8	16
Normal	AC_BE	16	1024
Segundo plano	AC_BK	16	1024

Todavia, como o mecanismo não é capaz de diferenciar as causas e os tipos de colisão, ele aplica a expansão das janelas de contenção sempre que um quadro de confirmação é esperado

e não é recebido. No entanto, interferências de diversos tipos podem causar a perda do sinal e, invariavelmente, o mecanismo de contenção presume que a perda do ACK foi causada por uma colisão. Sendo assim, a mesma providência é aplicada em todos os casos, o que não é eficaz para interferências externas. O Capítulo 3 relaciona algumas das principais propostas para modificar o processo de contenção com o objetivo de resolver esta imperfeição. Em geral, a literatura diferencia as colisões das demais interferências pela sua origem, limitando o conceito de colisão às interferências de sinal entre equipamentos do mesmo padrão e posicionados no mesmo domínio. Para este estudo, distingue-se os diferentes tipos de colisão, pois nem todos os tipos estão relacionados com o processo que se pretende aprimorar.

2.4.2 Tipos de Colisões

Existem dois tipos de colisão: normais e anômalas. As **colisões normais** ocorrem quando o contador do *backoff* termina simultaneamente em dois ou mais equipamentos e os sinais colidem logo no início da transmissão, quando as estações estão recebendo o cabeçalho do quadro e, por este motivo, também são conhecidas como *colisões de cabeçalho*. Neste caso, expandir as janelas de contenção do *backoff* ajuda a reduzir a probabilidade de uma nova colisão nas transmissões subsequentes. Entretanto, caso algum dispositivo falhe em determinar se o canal está livre ou ocupado, pode iniciar suas transmissões a qualquer momento, provocando **colisões anômalas**, no meio ou no final de uma recepção, também chamadas de *colisões tardias*. Este problema é conhecido como **terminal oculto** e a literatura provê uma variedade de trabalhos relacionados especificamente à sua solução. Todavia, neste estudo, foca-se no contexto do *backoff* e concentra-se nas **colisões normais**, que são inerentes ao mecanismo de acesso ao meio das redes do padrão 802.11.

2.5 Resumo

Este capítulo apresentou os conceitos importantes sobre o mecanismo de acesso ao meio usado nas redes 802.11 e sobre o problema das colisões. Este problema é mais proeminente em redes densas. Esta imperfeição causa degradação de desempenho, principalmente em transmissões de voz e de vídeo. Sua causa está no componente aleatório do processo de coordenação do acesso, cujo formato básico é o mesmo desde a primeira versão do protocolo. A contagem do *backoff*, concebida para evitar transmissões simultâneas tão logo o canal esteja disponível, não é suficiente para evitá-las em redes densas. As colisões originadas pelas transmissões concorrentes resultam em sinais ilegíveis e desperdício de tempo do canal, reduzindo sua eficiência. O tamanho das janelas de contenção é um dos principais fatores relacionados com a probabilidade de que ocorram colisões. Apesar de o mecanismo efetuar a expansão das janelas quando percebe alguma colisão, a reinicialização do tamanho das janelas após as transmissões bem-sucedidas impede que a intervenção seja eficaz, com perdas crescentes à medida que a densidade da rede aumenta. Além do mais, as funções para classificar e priorizar o tráfego, inseridas nas últimas emendas do padrão, agravam a incidência de colisões. Sendo assim, as novas emendas devem empregar meios para aliviar a ocorrência deste problema e, com isto, obter maior eficiência destas redes.

Capítulo 3

Revisão bibliográfica

Este capítulo apresenta uma revisão dos principais estudos publicados sobre os temas discutidos neste trabalho. O texto discorre sobre os modelos analíticos que representam o processo de contenção usado no mecanismo de acesso ao meio, destacando os fatos pertinentes ao problema das colisões no âmbito das redes densas. Em seguida, apresenta estudos práticos que evidenciam a relevância do problema em cenários reais e expõe as soluções triviais disponíveis na literatura, classificando-as e descrevendo-as. Posteriormente, foca em estudos prévios sobre reduções da duração dos *slots*, característica-chave da solução proposta ao TGax, avaliada neste trabalho, e também apresenta e discute outras linhas de soluções abordadas nesta pesquisa, posicionando assim cada proposta nesse enredo.

3.1 Estudos e Modelos Analíticos

3.1.1 O Modelo de Bianchi

A literatura fornece uma ampla gama de modelos analíticos sobre o funcionamento da DCF no padrão 802.11. A proposta de maior destaque foi apresentada em [Bianchi, 2000] e foi citada e validada pela comunidade científica em centenas de trabalhos. O modelo de Bianchi concentra-se na carga máxima que o sistema consegue suportar em condições estáveis, utilizando métricas baseadas na taxa de transferência e na probabilidade de colisão. A proposta utiliza uma Cadeia de Markov que expressa as mudanças de estado das estações dentro do processo de *backoff*, abrangendo as alterações no tamanho das janelas de contenção. Bianchi supõe uma **probabilidade de colisão independente e constante**, a partir da qual o processo é modelado conforme ilustrado na Figura 3.1. Apesar de modelos mais sofisticados terem sido propostos, este permanece sendo o mais empregado na literatura.

Bianchi retrata o processo de *backoff* em dois eixos $\{s(t), b(t)\}$ correspondentes ao processamento da contagem regressiva de tempo $b(t)$ e aos estágios do processo do *backoff* $s(t)$. O tamanho da janela é representado por W , iniciando com o mínimo estipulado na norma (CW_{min}) e aumentando exponencialmente a cada colisão, dado por $W_i = 2^i W$, onde $i \in [0, m]$ e corresponde ao número de iterações da expansão das janelas, limitada em m iterações, equivalente ao seu tamanho máximo (CW_{max}). Com isto, pode-se intuitivamente afirmar que quanto maior é o valor de W , menor é a probabilidade de colisões. Por outro lado, quanto maior o número n de estações, maior é a chance de que ocorram. Como fator de aproximação, Bianchi propôs utilizar uma **probabilidade condicional** p e, inferindo-a como constante, calculou as probabilidades de cada tipo de alteração de estado do mecanismo (Eq. 3.1).

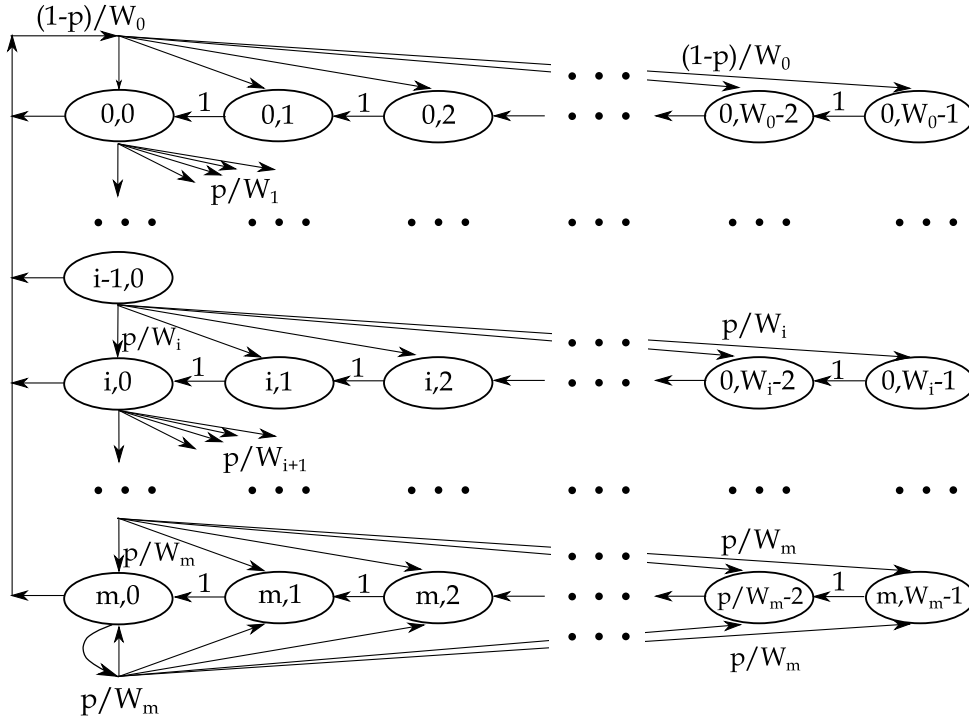


Figura 3.1: Cadeia de Markov proposta em [Bianchi, 2000] para modelar a DCF

$$\begin{cases}
 P\{i, k \mid i, k+1\} = 1 & k \in (0, W_i - 2) & i \in (0, m) \\
 P\{0, k \mid i, 0\} = (1-p)/W_0 & k \in (0, W_0 - 1) & i \in (0, m) \\
 P\{i, k \mid i-1, 0\} = p/W_i & k \in (0, W_i - 1) & i \in (1, m) \\
 P\{m, k \mid m, 0\} = p/W_m & k \in (0, W_m - 1)
 \end{cases} \quad (3.1)$$

A partir destas premissas obtém-se a probabilidade τ de uma estação iniciar sua transmissão em um determinado *slot*, quando a contagem regressiva do *backoff* chega a zero (Eq. 3.2). Porém, a probabilidade de transmissão depende da probabilidade condicional de colisão p , encontrada através da chance de que pelo menos uma das $n - 1$ estações esteja transmitindo quando outra iniciar sua transmissão com uma probabilidade τ (Eq. 3.3). Se o aumento exponencial das janelas não for considerado, então é possível simplificar o valor de τ tornando $m = 0$ e, desta forma, a probabilidade de colisão pode ser calculada de acordo com o tamanho da janela (Eq. 3.4). E a probabilidade de uma transmissão bem-sucedida P_s será a chance de que apenas uma única estação utilize o canal em dado momento, complementar à probabilidade P_c de uma colisão no canal (Eq. 3.5).

$$\tau = \sum_{i=0}^m b_{i,0} = \frac{b_{0,0}}{1-p} = \frac{2(1-2p)}{(1-2p)(W+1) + pW(1-(2p)^m)} \quad (3.2)$$

$$p = 1 - (1-\tau)^{n-1} \quad (3.3)$$

$$\tau = \frac{2}{W+1} \quad (3.4)$$

$$P_s = \frac{n\tau(1-\tau)^{n-1}}{1-(1-\tau)^n} \quad \text{e} \quad P_c = 1 - P_s \quad (3.5)$$

3.1.2 Modelando Redes Densas

A proposta de Bianchi foi utilizada como base para diversos outros modelos que adicionaram novos fatores e estados, como, por exemplo, a interrupção da contagem regressiva do *backoff* e o limite de retransmissões a partir do qual as estações passam a descartar quadros. Vários trabalhos adaptaram-no para configurações não saturadas e, ainda, incluíram representações de *buffers*, filas e outros recursos que influenciam o desempenho da rede. Apesar de nenhum deles ser capaz de abranger todos os ambientes possíveis no mundo real, eles propiciam a identificação de fatores-chave para o desempenho das redes. Em sua maior parte, utilizaram a **probabilidade condicional de colisões** como uma variável-chave para sua forma de descrever o mecanismo [Dai e Sun, 2013]. A curva desta variável está diretamente relacionada com a quantidade de nós, crescendo à medida que a densidade da rede aumenta. Em maior ou menor grau, os modelos em [Bianchi, 2000], [Ziouva e Antonakopoulos, 2002], [Chatzimisios et al., 2002], [Daneshgaran et al., 2008], [Zhang et al., 2011] e [Gottapu et al., 2013] confirmam esta tendência mesmo em ambientes não saturados, como pode ser visualizado na comparação publicada em [Gottapu et al., 2013], reproduzida na Figura 3.2.

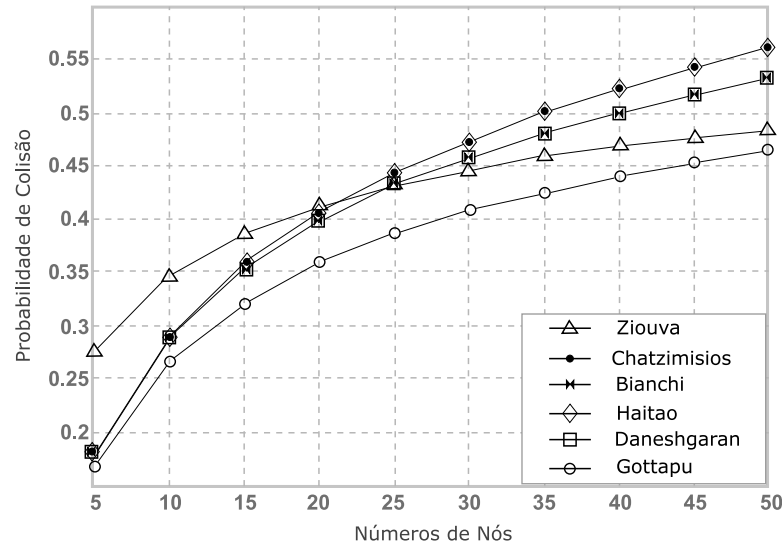


Figura 3.2: Comparação dos modelos analíticos em [Gottapu et al., 2013]

Outro fator-chave é o **tamanho das janelas de contenção**. A variação no tamanho das janelas, que ocorre no BEB, causa instabilidade ao retornar bruscamente para o valor inicial depois de uma transmissão bem-sucedida. Com isto, a probabilidade de colisões aumenta subitamente tão logo a janela tenha atingido um tamanho adequado para a densidade da rede. Para contornar este problema, pesquisadores sugeriram a alteração do *backoff* para que o crescimento exponencial seja acompanhado por um decrescimento similar [Song et al., 2003]. Adicionalmente, outros pesquisadores sugeriram considerar o histórico de colisões do canal antes de efetuar as alterações no tamanho das janelas, fazendo com que os nós mantenham suas janelas pequenas quando a carga for baixa e aumentem-nas quando for alta [Cheng et al., 2013].

Em geral, estas pesquisas indicam que janelas maiores são mais adequadas para ambientes saturados e densos, pois reduzem as colisões, enquanto que janelas menores são mais adequadas para ambientes pequenos e não saturados, pois reduzem o tempo de acesso ao canal [Adnan e Park, 2013]. Consoante a isto, os estudos analíticos acima citados mostram que o atual mecanismo de contenção apresenta altas taxas de colisões em cenários com grande número de nós e elevada carga de tráfego, resultando em baixas taxas de transferência. Entretanto, estes modelos não consideram ambientes heterogêneos, onde grupos de dispositivos possam atuar com diferentes mecanismos de contenção, como ocorreria se um novo mecanismo fosse introduzido gradualmente em redes pré-existentes. Sendo assim, novos estudos e modelos devem considerar ambientes compartilhados com o legado para melhor representarem os ambientes reais.

3.2 Estudos Práticos

Os resultados obtidos com os modelos analíticos citados na seção anterior indicam que o problema das colisões é muito prejudicial para o desempenho das redes 802.11 em ambientes densos. Entretanto, alguns estudos práticos indicam que o cenário pode ser ainda pior. Em [Kritzinger et al., 2010], os autores descrevem um experimento para medir a eficiência da DCF em um ambiente real. Eles também comparam os dados obtidos no *testbed* seguindo os modelos de Bianchi e Ziouva, além de um terceiro modelo proposto no trabalho deles (Figura 3.3). As conclusões diferem significativamente e indicam que os modelos analíticos são pessimistas para redes com pequeno número de nós e otimistas para redes com muitos nós. O *testbed* mostrou uma eficiência muito baixa a partir de um número relativamente pequeno de nós, em uma escala inaceitável para o uso de aplicações multimídia, como as que são tipicamente encontradas na rede mundial de computadores (Internet).

Corroborando com estas conclusões, em outro estudo de campo descrito em [Patro et al., 2013], os autores mediram o desempenho de pontos de acesso instalados em ambientes residenciais no centro da cidade de Madison. Os dados foram coletados em dois tipos de apartamentos durante seis meses, sendo que o primeiro grupo continha muitos pontos de acesso com poucos usuários e o segundo continha poucos pontos de acesso com muitos usuários. O experimento também avaliou um cenário com casas em subúrbios. As métricas consideraram vários tipos de causas relacionadas com o desempenho e com a qualidade percebida pelo usuário, sendo que o **tempo do canal** (*airtime*) e as **perdas de quadros** foram os principais fatores geradores de "performance muito ruim". Nos conjuntos de apartamentos, a perda de quadros foi a principal causa em **49,5%** e **78,1%** dos casos, respectivamente em cada grupo. Os autores apontam as colisões como o potencial motivo para estas perdas e atribuem ao menos **19%** delas às fontes externas de transmissores *Wi-Fi* vizinhos.

Em uma escala maior, baseada em medições de *hotspots* instalados em centros de convenções, o experimento descrito em [Gupta et al., 2012] indica que o mecanismo da DCF do 802.11 provê as mesmas oportunidades de acesso tanto para os **pontos de acesso** quanto para as **estações** operando no mesmo conjunto. O estudo demonstra que isso não é adequado para estas redes por causa da elevada quantidade de colisões que ocorre quando muitos terminais estão competindo pelo canal e também pela assimetria no perfil de tráfego. Nas medições, os autores observaram que o tráfego é predominantemente de *downlink*, acima de 80%. Esta assimetria, combinada com a igual oportunidade que o mecanismo fornece tanto para os pontos de acesso quanto para as estações, resulta em pontos de acesso congestionados e, portanto, em perdas de quadros. Eles reduziram o tamanho das janelas de contenção dos pontos de acesso e, assim, garantiram maior prioridade para estes equipamentos, obtendo ganho de 700% na taxa de transferência agregada de *downlink*, em testes com 45 estações.

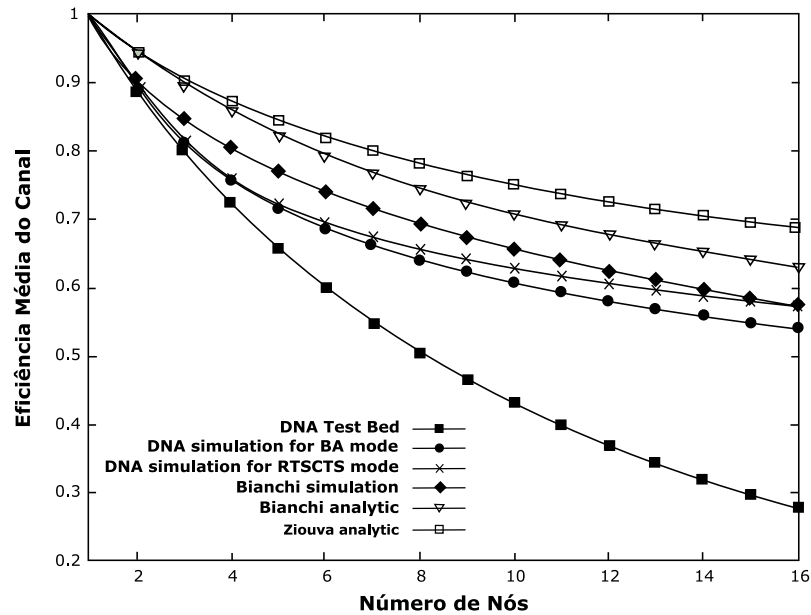


Figura 3.3: Comparação entre os modelos analíticos e o *testbed* em [Kritzinger et al., 2010]

Estes estudos são indicativos de que o mecanismo de acesso ao meio das redes 802.11 necessita de ajustes para suportar **redes densas**, apontando a DCF e o processo de contenção como as causas do desempenho ruim. Por isto, algumas opções de contorno têm sido adotadas, tais como as **funções de alocação dinâmica de canais** e sistemas de **coordenação entre pontos de acesso**, que buscam reduzir a quantidade de equipamentos operando no mesmo canal, distribuindo-os entre as frequências disponíveis. Não obstante, medições realizadas em grandes cidades indicam que a maioria das instalações mantém as suas configurações definidas em fábrica, mesmo que conflitantes com as redes vizinhas, formando conjuntos com dezenas ou centenas de equipamentos operando no mesmo canal, principalmente na faixa de frequência de 2,4GHz. Por consequência, com o observado crescimento destas redes, as faixas disponíveis podem não ser suficientes para atender a demanda estimada, requerendo melhorias no atual mecanismo de acesso [Alderfer, 2013].

3.3 Soluções para Amenizar o Problema das Colisões

Buscando contornar esse problema, a literatura contém uma diversidade de pesquisas com sugestões para controlar dinamicamente o tamanho inicial da janela de contenção ou substituir todo mecanismo por outro livre de colisões. No presente estudo, as propostas neste sentido foram classificadas em mecanismos baseados em divisão de tempo, na regulagem dinâmica das janelas ou em canais de controle adicionais. Além disto, algumas propostas combinam mais de uma classe de solução em um único protocolo ou modelo. As próximas seções descrevem cada uma destas categorias e proveem exemplos de protocolos que as implementam.

3.3.1 Canais de Controle e Domínio de Frequência

As últimas versões do padrão 802.11 incluíram mudanças na camada física para explorar uma faixa maior do espectro. Isto permitiu aproveitar uma diversidade de frequências com o objetivo de ampliar a capacidade de transmissão através do agrupamento de canais. Valendo-se da capacidade dos dispositivos trabalharem com diversos canais e subcanais, em [Rahul et al., 2009]

os autores apresentaram um método para a seleção de canais de comunicação entre pares de estações em uma faixa de frequência comum. Isto permite transmissões em paralelo entre diferentes duplas de transmissores e receptores, eliminando a necessidade de contenção para o acesso de um único canal em comum, ideal para redes em malha, com transmissões ocorrendo em várias direções. Porém, no caso das redes infraestruturadas esta comunicação concentra-se nos pontos de acesso, limitando seus ganhos.

Focando no problema dos transmissores não serem capazes de detectarem as colisões durante as transmissões em redes sem fio, a proposta em [Sen et al., 2010] utiliza um canal de controle para os receptores avisarem os transmissores em caso de colisão. Com isto, os transmissores podem interromper imediatamente suas transmissões e evitar o desperdício de tempo que normalmente ocorre nas colisões. Para isto, os transmissores devem contar com duas antenas, uma para transmissão e outra para escutar o canal de controle, pelo qual recebem as **notificações de colisão**. Por causa disto, os dispositivos têm que lidar com a diferença na força dos sinais recebidos na antena de controle, na qual o sinal transmitido pela outra antena é muito mais forte do que aquele recebendo a notificação. Nos experimentos, apenas os equipamentos localizados muito próximos conseguiram diferenciar estes sinais, quando a diferença na sua potência ficou abaixo de 16 dB. Para contornar este problema, os autores sugerem métodos de cancelamento de ruídos e recursos de *hardware* que não estão presentes no atual padrão 802.11.

Através de métodos de **cancelamento da própria interferência** (SIC), vários experimentos foram apresentados para demonstrar a capacidade de proporcionar transmissões em *full-duplex*. Alguns, inclusive, exigem poucas modificações sobre o *hardware* baseado no padrão 802.11 [Choi et al., 2010, Jain et al., 2011, Tang e Wang, 2015]. Porém, estes métodos têm apresentado problemas causados pela interferência entre diferentes *links*. Com o reaproveitamento do espectro, esta interferência passa a ocorrer em várias direções e é suficiente para interromper a comunicação com apenas alguns pares de nós operando em *full-duplex* nas redes vizinhas. A situação tende a piorar com o aumento e a proximidade das conexões, que são características das redes densas, e com o respectivo crescimento na quantidade de colisões entre as suas transmissões [Xie e Zhang, 2014, Afifi et al., 2016].

Combinando métodos para sinalização OFDM e para seleção de bandas de frequências estreitas ou subportadoras, a proposta em [Sen et al., 2011] utiliza uma antena para transmitir e outra para determinar quais subportadoras estão ativas. Quando o canal está livre, os dispositivos que pretendem utilizá-lo sorteiam um valor correspondente a uma subportadora e enviam um sinal por ela. Aquele que obtiver o menor valor inicia sua transmissão pelo canal, enquanto que os demais aguardam. Em caso de empate haverá uma colisão na subportadora e somente as estações que obtiveram o menor valor efetuam uma nova tentativa, antes de iniciarem suas transmissões. Logo, reduzem a chance de um novo empate nas rodadas subsequentes. Contudo, a proposta apresenta os mesmos desafios que a proximidade das antenas impõe e, portanto, estas ideias esbarram no requisito de compatibilidade com os padrões atuais. Em todos estes casos seria muito difícil a sua coexistência com os dispositivos já implantados e seriam exigidos recursos que não estão disponíveis [Kosek-Szott, 2012, Xie e Zhang, 2014, Afifi et al., 2016].

3.3.2 Divisão de Tempo

Os mecanismos baseados em divisão de tempo utilizam uma abordagem similar à estratégia de reservas utilizada no sistema TDMA. Porém, para evitar a necessidade de um controlador central, estas propostas utilizam um comportamento híbrido com o CSMA/CA. Em [Lee e Walrand, 2008], os autores propõem um esquema descentralizado de alocação de *slots*, chamado de *Zero Collision* ou apenas ZC, em que as estações reservam aqueles que pretendem

utilizar. Elas observam as transmissões em cada *slot* e identificam aqueles que foram alocados e os que estão livres. Após escolherem um *slot* livre, efetuam uma transmissão neste e observam se houve colisão. Em caso positivo, as duas estações procuram outro *slot*, mas caso a transmissão seja bem-sucedida então este *slot* passa a ser reservado para a estação, mantendo uma ordem de acesso que associa cada dispositivo com um ou mais *slots*. Com isto, o sistema converge rapidamente para uma condição estável, levando no máximo três segundos para 128 nós.

Todavia, os resultados práticos não atingiram o objetivo de eliminar por completo as colisões. As dificuldades em obter leituras precisas no CCA e as diferenças de sincronização dos relógios nos equipamentos fazem com que transmissões simultâneas inoportunas continuem acontecendo. No entanto, o desempenho observado do protocolo ZC foi superior ao CSMA/CA, mantendo relativamente constantes as taxas de transferência agregadas à medida que a densidade da rede aumenta, enquanto o CSMA/CA degrada com o aumento da densidade (Figura 3.4).

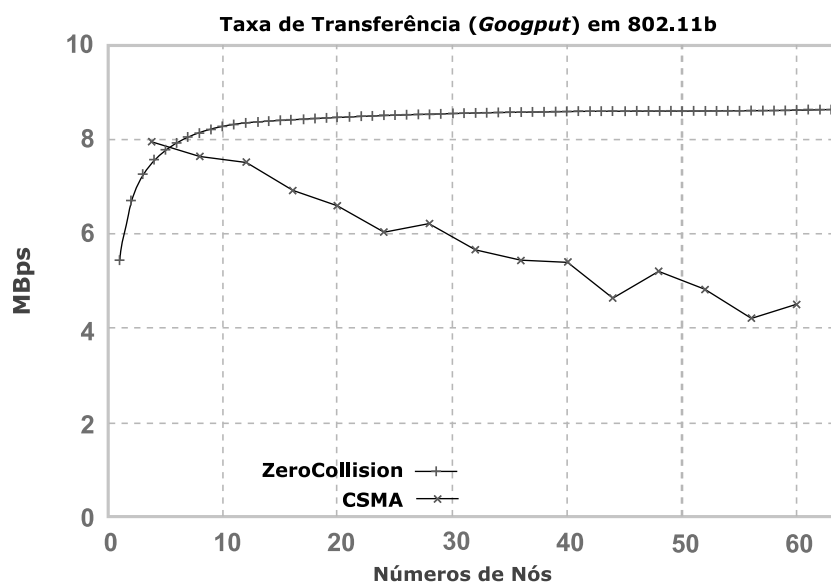


Figura 3.4: Taxa de transferência agregada - ZC x CSMA/CA em [Lee e Walrand, 2008]

De forma parecida com ZC, os protocolos L-BEB [Barcelo et al., 2009] e SRB [He et al., 2013] utilizam o atual processo aleatório do *backoff* para determinar um *slot* para cada dispositivo no seu primeiro acesso, permanecendo com o mesmo *slot* nas transmissões subsequentes. Enquanto o ZC utiliza janelas de tamanho fixo (128 *slots*), no L-BEB e no SRB as estações podem regular o tamanho das janelas em caso de colisões. Porém, esta mudança aumenta substancialmente o tempo necessário para atingir a estabilidade. E, buscando contornar isto, o protocolo SRB utiliza um índice de observação do canal que amplia ou reduz o tamanho das janelas conforme seu histórico, evitando ajustes causados por uma única colisão ou interferência. Desta forma, todos os dispositivos regulam o tamanho de suas janelas baseado neste índice e convergem mais rapidamente para a estabilidade.

Pelo mesmo motivo, o L-BEB recebeu extensões para resolver o problema do ajuste de tamanho das janelas e foi rebatizado como CSMA/ECA. O protocolo passou a compensar as estações que são prejudicadas na expansão das janelas, permitindo transmitir pacotes agregados à medida que as janelas aumentam, conforme proposto em [Fang et al., 2013]. Adicionalmente, combinou esta extensão com a propriedade de reiniciar o estágio do *backoff* e regular o tamanho das janelas conforme o número de nós [Sanabria et al., 2014a]. Entretanto, apesar de manter compatibilidade com o CSMA/CA, todos estes protocolos apresentam ganhos em desempenho somente quando todos os nós utilizam o mesmo protocolo no mesmo domínio de colisão. Caso

contrário, algumas estações permanecem no acesso aleatório e causam colisões e instabilidade que dificultam ou impedem a sua convergência, incluindo, por exemplo, as redes vizinhas com equipamentos legados [Natkaniec et al., 2013, Nishimura et al., 2015].

3.3.3 Adaptação Dinâmica da Janela de Contenção

As propostas de adaptação dinâmica do tamanho da janela podem contribuir para um melhor desempenho, ajustando-a em tempo de execução conforme a quantidade observada de usuários concorrentes. Elas evitam as perdas que uma janela inicial muito grande geraria em um ambiente não saturado, assim como os problemas de uma janela pequena em um ambiente denso [Adnan e Park, 2013]. Nesta perspectiva, as pesquisas têm sugerido mecanismos que adaptem o tamanho da janela através de um **controle pelo ponto de acesso** ou através de **estimativas de uso**, pela observação do tempo livre ou do congestionamento do canal.

Conforme descrito na Seção 2.3, o padrão 802.11 conta com a PCF, que é uma função opcional de acesso, controlada pela estação-base. Entretanto, este método não é adequado para tráfego assíncrono, pois o coordenador pode monopolizar o canal [Nahrstedt, 2011]. Contudo, como nas redes infraestruturadas há predominância de *downlink*, os pontos de acesso passam a ter maior influência na distribuição do tráfego, além de terem uma melhor visão do seu conjunto de serviços [Gupta et al., 2012]. Sobre este fundamento, diversas propostas da literatura sugerem ajustar as janelas de contenção das estações-base de forma distinta em relação às estações associadas. Por exemplo, a proposta em [Pries et al., 2008] utiliza medições estatísticas sobre as colisões e efetua uma troca de mensagens entre as estações e os seus pontos de acesso para ajustar as janelas. Já em [Wang, 2012], os autores utilizam o número de nós, as condições do canal e as requisições de QoS das aplicações para definir o seu tamanho.

A troca de mensagens entre os pontos de acesso e suas estações associadas está prevista no padrão 802.11. O item 8.4.2.31 da [IEEE, 2012] descreve o ajuste dos parâmetros do EDCA, inclusive das janelas de contenção, através do estabelecimento de políticas que alteram os seus valores *default* na Base de Informações de Gerenciamento (MIB) das estações. Contudo, este ajuste raramente é utilizado e algumas implementações não adotam os parâmetros sinalizados pelos pontos de acesso. Além do mais, este recurso serve para configurar apenas o conjunto de serviços do ponto de acesso, ou seja, nenhuma influência ocorre nos parâmetros do EDCA de dispositivos em conjuntos vizinhos [Hiertz et al., 2015]. Logo, estes métodos têm pouco efeito quando os equipamentos não fazem parte do mesmo BSS.

Alguns protocolos, como o **TDuCSMA** [Vesco e Scopigno, 2009], o **Adaptive AP** [Nishimura et al., 2015], o **WiFox** [Gupta et al., 2012] e o **TRACK** [Huang et al., 2014], ajustam os parâmetros de cada estação individualmente, sob o controle do ponto de acesso, que fica responsável por sincronizar as configurações, alterando os parâmetros de acesso nas estações. No caso do **TDuCSMA**, em diferentes intervalos de tempo, uma estação é escolhida para ser priorizada e enviar seus quadros sem contenção, enquanto as demais ajustam janelas maiores. O processo é similar ao método da divisão de tempo, que busca garantir transmissões livres de colisão. Porém, nesta situação, os intervalos são maiores e as estações não priorizadas permanecem competindo pelo acesso ao canal conforme o tamanho de suas janelas [Vesco et al., 2014]. Todavia, como o controle do ponto de acesso está restrito ao seu conjunto de serviços, estes protocolos sofrem as mesmas restrições de atuação sobre as redes vizinhas compartilhando o mesmo canal, resultando em colisões nos dispositivos priorizados quando duas ou mais estações são selecionadas para transmitir sem contenção.

Em outra linha, sem um controle centralizado no ponto de acesso, a literatura apresenta propostas que regulam concomitantemente o tamanho das janelas de contenção em todos os

dispositivos operando no mesmo canal. Os métodos consistem em observar o canal e aplicar alguma métrica para definir o tamanho ideal das janelas de acordo com a densidade da rede, obtida através da observação da utilização do canal. Desta forma, redes vizinhas podem se ajustar automaticamente, sem a necessidade de uma autoridade controladora. Em [Kang et al., 2010] e [Chun et al., 2012], os autores propõem contar o número de *slots* não utilizados em um período do *backoff* para derivar a quantidade de dispositivos usando o canal. E o tamanho das janelas é ajustado pelo número de nós. Em [Hong et al., 2012] a estimativa é feita pelo número observado de *slots* livres e ocupados, sem associar este valor diretamente ao número de nós, mas sim à ocupação do canal. Propostas mais recentes incluem outros fatores, tais como a velocidade de transmissão dos dispositivos, para garantir que estações mais rápidas e que ocupam menos tempo do canal tenham o seu acesso facilitado [Tarasyuk et al., 2014].

Contudo, estas sugestões falham caso os equipamentos vizinhos não cooperem, como ocorrerá nos ambientes já implantados com o atual padrão. Os dispositivos que não ajustam suas janelas, seja porque não estão sob a mesma coordenação ou porque não têm capacidade de ajustá-las, acabam transmitindo de forma desordenada, impedindo a convergência dos demais para um tamanho de janela ideal. Apesar disto, em todos os casos, as pesquisas apontam que uma janela inicial maior é mais adequada para ambientes densos [Malone et al., 2007, Du et al., 2011, Adnan e Park, 2013, Gottapu et al., 2013, Hsu e Hsieh, 2013]. Entretanto, em um ambiente misto, o simples aumento das janelas de contenção criaria uma vantagem para os equipamentos legados ou vizinhos que a mantivessem pequena [Hiertz et al., 2015].

3.4 Redução dos *Slots*

A proposta avaliada neste trabalho difere das demais por aumentar a quantidade de *slots* da janela de contenção através da redução da duração dos *slots*. Com isto, o tamanho da janela é mantido com o mesmo intervalo total de tempo, evitando os atrasos que um intervalo maior geraria. Porém, a quantidade de *slots* aumenta, gerando mais oportunidades de transmissão e reduzindo a probabilidade de colisões. Após uma busca na literatura, conclui-se que não há avaliações extensivas publicadas sobre esta proposta e há poucos estudos relacionados com mudanças na duração do *slots* em si. Entretanto, um pequeno número de resultados de pesquisa publicados permite observar consequências preliminares sobre este parâmetro.

Em [Rubinstein et al., 2007], os autores apresentaram uma análise matemática de protocolos de acesso ao meio e demonstraram que o uso de *slots* curtos de $9\mu\text{s}$ do padrão 802.11g possui uma capacidade de evitar colisões em torno de 53% enquanto que a configuração com *slots* de $20\mu\text{s}$ possui apenas 43% desta capacidade nas mesmas condições. Em outro estudo reportado em [Primiani et al., 2010], usando uma câmara de reverberação, os pesquisadores realizaram medições para comparar equipamentos dos padrões 802.11b e 11g. O experimento mostrou que o tempo de resposta de conexões 11g (OFDM - 6Mbps) ficou em menos de um terço do que as 11b (CCK - 5Mbps), mesmo com altas taxas de retransmissões. Os autores explicaram o resultado através da diferença na duração do *slot*, curto no padrão 11g. Em mais um experimento publicado em [Harjula et al., 2011], os autores avaliaram interferências externas em redes sem fio. Os resultados em *testbed* demonstraram que os protocolos com menor duração de *slot* conseguem resistir melhor às interferências por *jamming signals*. As conclusões obtidas nestes estudos revelam algumas vantagens de um *slot* com menor duração.

Porém, outras pesquisas apontam que a redução do *slot* pode trazer certos inconvenientes. Em uma avaliação de sistemas de sensores baseados no padrão 802.11, os autores mediram a taxa de sucesso na transmissão de *beacons* em dispositivos 11g ($20\mu\text{s}$) e 11a ($9\mu\text{s}$) e perceberam que a taxa é menor neste último [Uchimura et al., 2010]. Eles justificaram que há menos

oportunidades de transmissão para envio dos *beacons* porque o canal fica mais ocupado quando é utilizado um *slot* menor. Comparações entre os padrões 11n e 11ac identificaram problemas de coexistência relacionados com a duração do *slot*, como no estudo de [Abusubaih et al., 2013]. Isto ocorre porque todo o conjunto básico de serviços deve operar com *slots* de $20\mu s$ caso algum equipamento opere com uma duração diferente de $9\mu s$. Estes trabalhos permitem prever algumas das consequências que a redução nos *slots* pode trazer. Todavia, um intervalo de $4,5\mu s$ trará ainda outros notáveis desafios.

3.5 Imperfeições na Verificação do Canal

Com a redução dos *slots* para um intervalo de apenas $4,5\mu s$, os eventos que atualmente devem ocorrer dentro de um *slot* com duração de $9\mu s$ precisam ser ajustados para que realizem as suas funções em metade deste prazo. Logo, esta redução exerce influência no CCA, conforme descrito na Seção 2.3.1. A pesquisa de [Ramachandran e Roy, 2007] investigou o impacto de imperfeições neste processo e calculou a influência de falsos positivos e falsos negativos no desempenho e na eficiência energética. O estudo revelou que em taxas de transferência maiores é mais importante contar com uma alta probabilidade de detecções corretas para evitar o custo das colisões. O foco, porém, estava em redes pessoais sem fio, com outro mecanismo de contenção e intervalos maiores que nas redes locais. Sobre o contexto das redes no padrão 802.11, a busca efetuada na literatura não encontrou estudos que esclareçam o quanto uma redução da duração do *slot* pode afetar o desempenho da detecção do canal ocupado.

3.6 Discussão e Perspectivas

Como visto nas seções anteriores, a literatura reconhece o problema das colisões em redes sem fio do padrão 802.11, principalmente em redes densas, tanto nos modelos analíticos quando nos estudos práticos publicados, sem que tenha sido apresentada uma solução eficaz. A Tabela 3.1 resume as estratégias utilizadas nestas soluções. As saídas apresentadas esbarram em problemas de compatibilidade e custos que as inviabilizam em um ambiente real, onde há redes vizinhas e dispositivos legado compartilhando o mesmo meio. Contudo, algumas das propostas para amenizar o problema indicam que o alargamento das janelas de contenção obtém bons resultados ao reduzir as chances de colisões. Por consequência, o ajuste dinâmico destas janelas conforme a densidade parece ser uma opção adequada. Entretanto, a falta de consenso sobre a métrica ideal para este ajuste e a impossibilidade de ajustar as janelas dos dispositivos legado acabam por inviabilizar estas propostas.

Neste contexto, o **alargamento das janelas de contenção através da redução na duração dos *slots*** surge como uma nova alternativa, detalhada nos próximos capítulos e avaliada neste estudo. Os trabalhos citados na Seção 3.4 indicam que esta estratégia pode entregar bons resultados, pois há forte evidência de que uma redução na duração dos *slots* melhora o tempo de resposta e amplia a capacidade de transmissão. E a evolução do *hardware* que ocorreu desde que o padrão 802.11 foi lançado, permite antever que tal redução é possível. Todavia, para que se torne viável, esta opção tem que superar os desafios relacionados à verificação do canal ocupado.

Tabela 3.1: Vantagens e desvantagens das soluções propostas para o problema das colisões

Estratégia / Solução	Vantagens	Desvantagens	Referências
Canais de Controle e Domínio de Frequência	Permite detecção de colisão	Exige canais de controle adicionais	[Rahul et al., 2009]
	Permite negociação do acesso ao meio	Banda adicional aumenta o custo	[Sen et al., 2010]
	Comunicação em paralelo (full-duplex)	Incompatível com padrão atual	[Sen et al., 2011]
Divisão de Tempo e Backoff Determinístico	Operam como TDMA (sem controlador)	Exige boa sincronização dos relógios	[Lee e Walrand, 2008]
	Converge rápido para estado sem colisões	Dispositivos legado (ou externos) no mesmo canal impedem a convergência	[Barcelo et al., 2009]
			[He et al., 2013]
Adaptação Dinâmica das Janelas de Contenção			[Sanabria et al., 2014a]
	Ajusta-se automaticamente à demanda	Exige métrica comum entre os nós	[Pries et al., 2008]
	Pode ser controlado pelo ponto de acesso	Não há consenso sobre a métrica ideal	[Kang et al., 2010]
	Permite ajuste aos requisitos de qualidade definidos pelo usuário (QoS/QoE)	Ineficaz se redes vizinhas não cooperarem e mantiverem suas janelas pequenas	[Wang, 2012]
			[Chun et al., 2012]
Alargamento das Janelas de Contenção através da Redução dos Slots	Pesquisas indicam que slots menores aumentam a capacidade de evitar colisões	Não busca estados sem colisões (apenas minimiza o problema)	[Hong et al., 2012]
	Compatível com legado se tamanho dos slots for múltiplo do atual	Impacto no CCA não é conhecido	[Tarasyuk et al., 2014]
	Pode ser aplicado com as soluções acima		
			Não há publicações sobre protocolos com esta estratégia para o problema de colisões

3.7 Resumo

A literatura contém uma diversidade de modelos para análise do mecanismo de acesso ao meio utilizado nas redes do padrão 802.11. Tanto estes modelos quanto alguns estudos práticos têm confirmado que o mecanismo não é adequado para redes densas. Além do mais, as soluções publicadas possuem limitações que as impedem de coexistir com a base já implantada sem que haja perdas de desempenho. A proposta em [Hiertz et al., 2015], fundamentada no alargamento das janelas de contenção através da redução dos *slots*, pode ser uma alternativa que não sofre destas limitações. No entanto, a literatura carece de estudos sobre este tipo de redução e suas consequências. Todavia, o presente estudo busca contribuir para reverter este quadro.

Capítulo 4

Análise e Aprimoramento do EICW

O **Alargamento da Janela de Contenção Inicial**, do inglês *Enlargement of Initial Contention Window (EICW)*, introduzido em [Hiertz et al., 2015], busca reduzir a probabilidade de colisões em redes sem fio, através da criação de mais oportunidades de transmissão dentro das janelas de contenção do mecanismo de acesso ao meio. Este capítulo descreve, contextualiza e investiga o seu funcionamento, fornecendo uma análise matemática e uma discussão sobre a sua capacidade de mitigar colisões. O texto contém ainda uma síntese dos desafios e das pendências para a viabilização da hipótese, reportando os próximos passos para que se torne viável. Adicionalmente, desenvolvem-se oportunidades de extensão, com o objetivo de ampliar os ganhos de desempenho obtidos com este método, agregando-lhe estratégias de divisão de tempo e de ajuste automático das janelas. Com isto, diversas abordagens são propostas ao combinar outros mecanismos com o **EICW** e, assim, novas soluções são alcançadas.

4.1 Visão Geral

O **EICW** distingue-se dos demais métodos de mitigação de colisões por basear-se apenas no ajuste de parâmetros de duração dos *slots* e do tamanho das janelas, sem introduzir novos mecanismos ou estruturas no presente protocolo de acesso ao meio. Sua proposição foi aprovada em primeira instância pelo grupo TGax, por votação dos seus membros, tendo sido selecionada para as fases posteriores de avaliação e revisão, conforme descrito na Seção 2.1. Caso seja aprovada em todas as fases, a mudança será inserida na emenda 802.11ax, prevista para ser finalizada em 2019. Embora o TGax ainda não tenha sinalizado modificações adicionais além do **EICW**, outras mudanças no mecanismo de acesso têm sido cogitadas. Atualmente, busca-se explorar oportunidades neste sentido e, dentre estas, os protocolos **CSMA/ECA** e **TDuCSMA** têm sido ponderados como promissores. Contudo, para que se tornem viáveis, precisam demonstrar que conseguem alcançar as metas de desempenho estabelecidas pelo TGax. Além do mais, percebe-se que estes protocolos podem ser aplicados em conjunto com o **EICW**. Logo, esta pesquisa explora a possibilidade de harmonizar essas propostas.

4.2 Modelo da Rede

O **EICW** aplica-se exclusivamente às redes do padrão 802.11, tendo como base as especificações descritas nas emendas 802.11n e 802.11ac, base para o 802.11ax. Seguindo a tendência evolutiva observada a cada emenda, espera-se que o novo padrão preserve o legado e permita a coexistência com as regras definidas nas versões anteriores. Sendo assim, os

ajustes propostos devem funcionar com as modulações da camada física convencionadas nestas emendas. Além do mais, devem ser compatíveis com o mecanismo de contenção utilizado na camada de enlace, com a expansão exponencial do tamanho das janelas e, também, com a sua reinicialização após as transmissões bem-sucedidas no BEB. Ao atender estes requisitos, assegura-se a compatibilidade e evitam-se os problemas de cooperação com redes vizinhas e com o legado, que ocorrem nas demais abordagens conforme descrito na Seção 3.6.

Neste estudo foi utilizado como base o padrão 802.11n operando em multiplexação por divisão de frequências ortogonais (OFDM). Esta modulação é atualmente a opção que entrega as maiores taxas de transferência por canal, fazendo uso de *slots* de $9\mu\text{s}$, o menor dentre as alternativas vigentes. Contudo, o **EICW** não se limita a esta instância, podendo ser adaptado às demais variações de modulação e de tamanhos de *slots* do 802.11. Por exemplo, a pesquisa também explorou ambientes com modulação em sequência direta de espalhamento do espectro (DSSS) usando *slots* de $20\mu\text{s}$, obtendo resultados similares, ajustadas as devidas proporções. Todavia, como a modulação DSSS (802.11b) está em desuso, optou-se por concentrar o foco no estudo de ambientes com OFDM e *slots* de $9\mu\text{s}$.

Quanto à estrutura da rede, em tese, a solução pode ser aplicada tanto em exemplares infraestruturados quanto em *ad hoc*. O fato de haver ou não uma estação-base é indiferente à mudança sugerida pelo **EICW**, pois o método interfere apenas em procedimentos que são independentes da atuação de um ponto de acesso e, também, não exige um coordenador. Todavia, como a ampla maioria das redes Wi-Fi instaladas atualmente faz uso de estações-base, principalmente pontos de acesso de Internet, optou-se por utilizar redes infraestruturadas nas avaliações e simulações deste estudo. Ademais, há outros mecanismos de redução de colisões em avaliação para o 802.11ax, no qual o ponto de acesso atua como coordenador, que podem ser utilizados em conjunto com o **EICW**, como o **TDuCSMA**. Portanto, neste trabalho, foi convencionado um ambiente infraestruturado em todos os experimentos e análises.

4.3 Descrição do EICW

O **EICW** fundamenta-se na **redução da duração do slot na proporção inversa do aumento da janela de contenção**, ampliando a quantidade de intervalos da janela inicial de 16 para 32 *slots* e diminuindo o tamanho do *slot* de $9\mu\text{s}$ para $4,5\mu\text{s}$, conforme ilustrado pela Figura 4.1. Sendo assim, por exemplo, uma janela com $144\mu\text{s}$ dividida em 16 *slots* passaria a contar com 32 *slots* no mesmo intervalo de $144\mu\text{s}$, ampliando as oportunidades de transmissão. Com isto, os equipamentos operando com mais *slots* passam a ter uma probabilidade menor de que suas transmissões resultem em colisões por causa do maior número de opções para iniciarem os seus acessos e, por consequência, há redução em retransmissões e em descartes de quadros.

De forma similar, as janelas de tráfego prioritário do EDCA devem ser ajustadas de acordo com as regras já existentes para definição do seu tamanho, mantendo os mesmos valores na duração das janelas de contenção. Neste caso, o intervalo das janelas é mantido em 72 e $36\mu\text{s}$ respectivamente, com a quantidade de *slots* ampliada de 8 para 16 na categoria de vídeo e de 4 para 8 na categoria de voz, conforme demonstrado na Tabela 4.1. Logo, se as janelas de contenção forem preservadas com o mesmo intervalo total de tempo, então os equipamentos operando com *slots* de $9\mu\text{s}$ ou $4,5\mu\text{s}$ podem coexistir no mesmo ambiente e com o mesmo processo de acesso ao canal. Neste caso, não ocorrem os inconvenientes relatados em [Abusubaih et al., 2013], em que todo o conjunto básico de serviços tem que operar com o maior *slot* por causa de algum terminal legado operando no mesmo conjunto.

Com isto, espera-se que os equipamentos do futuro padrão permaneçam compatíveis com o padrão vigente se os demais intervalos baseados no *slot* forem ajustados na mesma

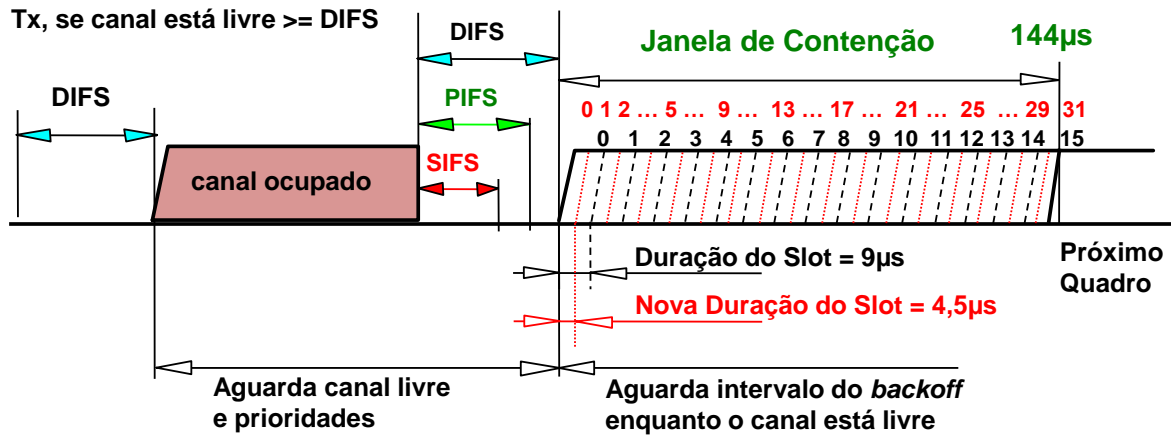


Figura 4.1: Alteração proposta no processo de *backoff*

Tabela 4.1: Parâmetros da janela de contenção (atual x proposto)

Categoria	Regra		Slot = 9µs			Slot = 4,5µs		
	Janela Inicial	Janela Máxima	CWmin (slots)	CWmin (µs)	CWmax (µs)	CWmin (slots)	CWmin (µs)	CWmax (µs)
AC_BK	CWmin	CWmax	16	144	9216	32	144	4608
AC_BE	CWmin	CWmax	16	144	9216	32	144	4608
AC_VI	CWmin/2	CWmin	8	72	144	16	72	144
AC_VO	CWmin/4	CWmin/2	4	36	72	8	36	72

proporção. Para isto, o AIFS deve ser redefinido, duplicando a parcela baseada na duração do *slot* (4.1) e a janela inicial passa a contar com o dobro de divisões (4.2). Além disso, o tamanho máximo das janelas deve permanecer limitado em 1024 *slots* para manter coerência com o limite de tamanho do campo nas especificações do 802.11. E, por conseguinte, ao ajustar os parâmetros desta maneira, as janelas de contenção de diferentes equipamentos apresentam-se sobrepostas e alinhadas, desde que operando com tamanhos de *slots* de 9 e 4,5µs.

$$AIFS : aSlotTime + SIFS \rightarrow aSlotTime * 2 + SIFS \quad (4.1)$$

$$CW_{min} : 15 \rightarrow 31 \quad (4.2)$$

4.3.1 Funcionamento

A implementação do **EICW** não depende de mudança nos pontos de acesso nem nos demais dispositivos operando no padrão atual. Basta apenas que os novos dispositivos utilizem *slots* menores e ajustem os demais parâmetros para manter a duração das janelas no processo de contenção (Tabela 4.1). Seguindo este protocolo, o mecanismo de acesso ao meio preserva o método já em uso, descrito na Seção 2.3, com a verificação do canal e a contagem do *backoff* iniciando logo após o meio ficar disponível, assim como a expansão das janelas após colisões. Isto posto, como a duração das janelas é mantida, a mudança assegura a compatibilidade com o atual mecanismo. Além do mais, a maior quantidade de *slots* nas janelas diminui a probabilidade de que ocorram colisões, o que evita desperdício e amplia a eficácia do canal.

4.3.2 Estendendo o EICW

Uma vez que a solução apresentada pelo **EICW** não altera substancialmente o atual mecanismo de acesso, ela pode ser combinada com outros métodos que também buscam mitigar colisões neste ambiente. Logo, nesta avaliação, propõe-se a exploração destas possibilidades, utilizando simultaneamente mecanismos de divisão de tempo e priorização de tráfego. Entretanto, analisar cada uma destas outras abordagens não é o objetivo deste trabalho, uma vez que já existem publicações com esta finalidade. Todavia, neste estudo, investiga-se a aplicação do **EICW** em conjunto com estes métodos, procurando confirmar sua capacidade de complementá-los ou assimilá-los. Aspira-se, com isto, identificar oportunidades de melhoria e de alcançar novas soluções baseadas no **EICW**.

4.4 Análise da Redução da Probabilidade de Colisões

Uma vez que o **EICW** fundamenta-se na mitigação de colisões para obter ganhos em desempenho, procurou-se inicialmente determinar a sua capacidade de reduzir a taxa de colisões. Para isto, utilizando análise combinatória, criou-se um modelo matemático que calcula a probabilidade de que ocorra alguma colisão em relação à quantidade de dispositivos concorrentes no canal e, também, em relação ao tamanho das janelas em *slots*. Pelos motivos expostos na Seção 2.4.2, foram consideradas apenas as colisões normais e inerentes ao *backoff*, desconsiderando as colisões causadas por interferências externas ao processo. Sendo assim, o modelo apresentado a seguir baseia-se tão somente no número de dispositivos e no tamanho da janela de contenção, desta forma diferenciando-se dos demais modelos disponíveis na literatura.

4.4.1 Modelo Matemático

Partindo de um estado inicial hipotético em que ainda não houve nenhuma colisão, supõe-se que todos os dispositivos usam janelas de contenção em seu tamanho mínimo CW_{min} e há n dispositivos pretendendo obter acesso. Neste caso, pode-se fazer uma analogia com um jogo em que há n competidores, cada um sorteando um número natural de 1 a CW , vencendo aquele que sortear o menor número, sendo que há uma mesma chance de qualquer competidor escolher qualquer número do intervalo. Por conseguinte, tem-se a probabilidade V de haver um vencedor isolado, que é a soma das probabilidades $V_1, V_2, \dots, V_{(CW-1)}$, onde cada V_i corresponde à chance de existir um vencedor isolado que tenha escolhido valor igual a i .

Sendo assim, o valor de V_i será dado pela Equação 4.3, porque ao todo há CW^n resultados possíveis, dos quais os que têm um vencedor com valor i são aqueles em que algum dos n participantes obteve o valor i e todos os outros $(n - 1)$ participantes obtiveram valores maiores. E, o valor de V será a soma destes V_i , conforme enunciado pela Equação 4.4, que corresponde à probabilidade de uma transmissão bem-sucedida P_s , sem empates no sorteio e, portanto, sem colisões. Logo, obtém-se a probabilidade de colisão P_c , que é complementar à probabilidade de uma transmissão bem-sucedida P_s , correspondendo a todos os casos em que houve mais de um competidor escolhendo o menor número, conforme expresso na Equação 4.5.

$$V_i = \frac{n * (CW - i)^{(n-1)}}{CW^n} \quad (4.3)$$

$$P_s = V = V_1 + V_2 + \dots + V_{(CW-1)}$$

$$P_s = \sum_{i=1}^{CW-1} \frac{n * (CW - i)^{(n-1)}}{CW^n} \quad (4.4)$$

$$P_c = 1 - P_s$$

$$P_c = 1 - \sum_{i=1}^{CW-1} \frac{n * (CW - i)^{(n-1)}}{CW^n} \quad (4.5)$$

Com isto, a probabilidade de colisões é calculada conforme o tamanho da janela de contenção e a densidade da rede. No padrão 802.11, as janelas têm tamanho inicial de 4, 8 ou 16 *slots* conforme o tipo de tráfego, respectivamente para voz, vídeo e dados não prioritários. E, conforme descrito na Seção 2.4.1, o tamanho da janela de contenção dobra a cada colisão até o limite máximo de 8, 16 ou 1024 intervalos, reduzindo assim a probabilidade de colisões nas tentativas seguintes. A Figura 4.2 ilustra esta probabilidade para cada opção de tamanho de janela em redes com densidade entre 1 e 80 dispositivos. Esta análise permite efetuar uma estimativa sobre a influência do tamanho da janela de contenção na probabilidade de colisões. Logo, em uma análise preliminar, conclui-se que o protocolo **EICW** tem a capacidade esperada de reduzir as colisões, pois uma janela inicial maior parte de uma curva com menos chance de colisão, assim como todas as expansões subsequentes.

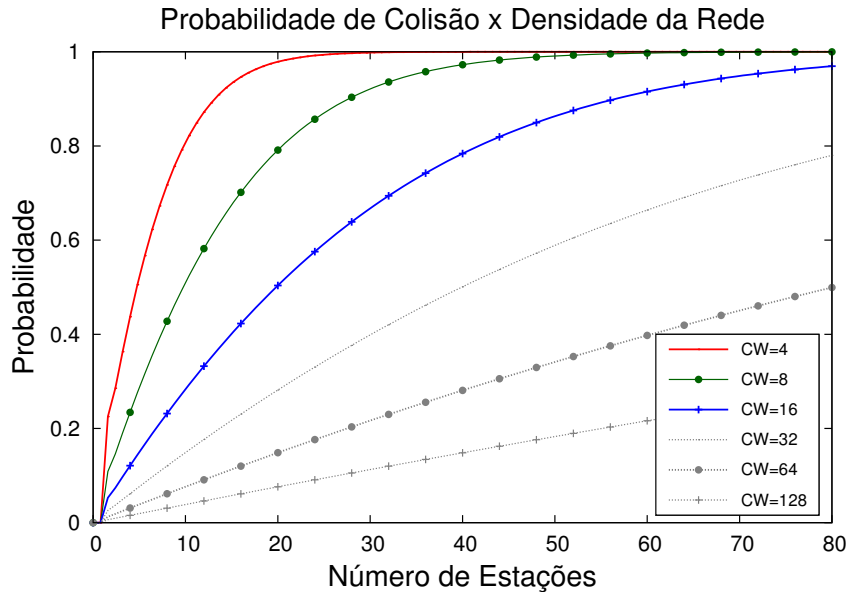


Figura 4.2: Probabilidade de colisões conforme a densidade da rede e o tamanho da janela

Todavia, na prática, esta situação hipotética em que todos os dispositivos iniciam com o mesmo tamanho de janela não deve ocorrer, pois a quantidade de competidores ou dispositivos muda a cada momento, encontrando valores que tendem para estas faixas conforme a quantidade de nós em cada uma delas. Entretanto, mesmo diante deste fato, a observação de cada uma das faixas permite supor a variação que as probabilidades de colisão devem sofrer ao alternar os seus tamanhos das janelas. Isto é mais evidente nas faixas destinadas ao tráfego de voz e vídeo, onde a expansão das janelas é mais restrita, conforme ilustrado em cores na Figura 4.3.

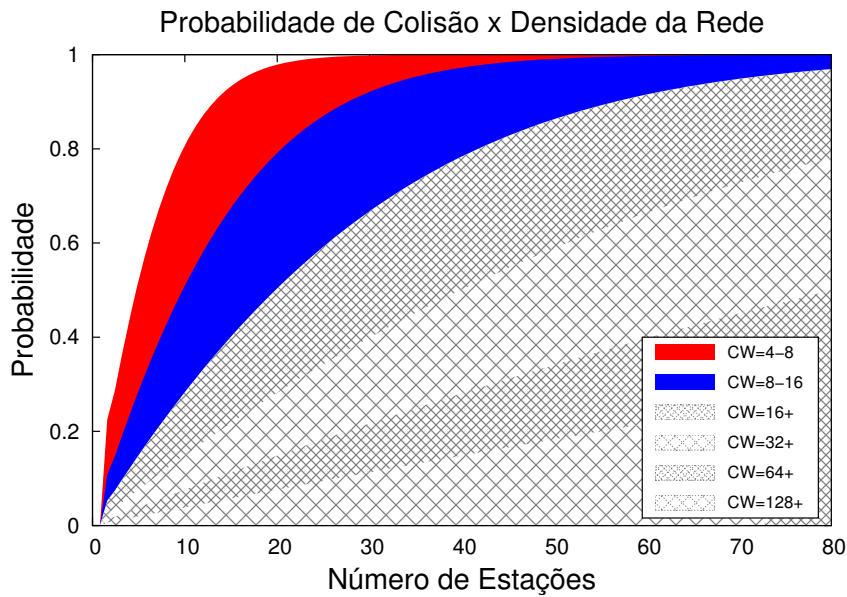


Figura 4.3: Probabilidade de colisões conforme a densidade da rede e a categoria do tráfego

Para compreender a Figura 4.3, considere-se que o padrão 802.11 classifica e separa o tráfego conforme a sua categoria e aplica tamanhos de janela reduzidos para os dados prioritários, ou seja, voz e vídeo. Para evitar que este tipo de tráfego sofra atrasos, as suas faixas são menores, expandindo o tamanho da janela em no máximo o dobro do seu valor inicial. Sendo assim, os terminais enviando dados de voz iniciam o processo de *backoff* com uma janela de quatro intervalos que pode ser expandida para até oito *slots* (em vermelho). E, de forma similar, os dispositivos enviando dados de vídeo iniciam o *backoff* com oito intervalos na janela inicial e podem expandi-la até dezesseis *slots* (em azul). Notoriamente, isto deveria resultar em uma vantagem no acesso ao meio para envio de tráfego prioritário, o que de fato ocorre em redes com poucos nós. Porém, à medida que a densidade da rede aumenta, estas faixas menores acabam provocando a elevação da taxa de colisões, causada pelas limitações na expansão de suas janelas de contenção no processo de *backoff* exponencial.

Para os demais tipos de tráfego, representados na Figura 4.3 através de texturas em escala de cinza, há maior incerteza na definição da probabilidade de colisões. Isto ocorre porque cada dispositivo pode estar com um diferente tamanho de janela em cada momento, dentro de um maior limite de expansões. Porém, esta probabilidade está contida dentro dos intervalos posicionados à direita da faixa inicial. E, com uma janela inicial passando de 16 para 32 *slots* conforme proposto no **EICW**, a probabilidade de colisões acaba sendo bastante reduzida, com decréscimos acima de 40% em canais operando com até 30 nós concorrentes, ao menos nas primeiras tentativas de transmissão. A Tabela 4.2 exhibe os ganhos esperados com a ampliação das janelas iniciais em cada categoria, considerando a situação hipotética proposta no modelo. A variação Δ obtida mostra a redução na probabilidade de colisões. Consequentemente, isto aumenta a chance de sucesso na primeira tentativa e, portanto, reduz a necessidade de retransmissões.

4.4.2 Discussão

Com menor necessidade de retransmissões, menos ampliações de janelas são demandadas no BEB e, portanto, reduz-se a oscilação que acontece após transmissões bem-sucedidas. Uma vez que as janelas retornam ao seu tamanho inicial após obterem êxito na comunicação, o atual mecanismo tende a elevar a chance de colisões tão logo a rede convirja para um tamanho

Tabela 4.2: Probabilidade de colisão conforme densidade da rede e tamanho da janela

Probabilidade de Colisão		Densidade da Rede						
		Quantidade de Nós Concorrentes no Canal						
Categoria	CW	5	10	20	30	40	60	80
Voz (AC_VO)	4	0,52148	0,80740	0,97885	0,99821	0,99987	1,00000	1,00000
	8	0,28650	0,50950	0,79135	0,92107	0,97256	0,99716	0,99974
	Δ	(45,1%)	(36,9%)	(19,2%)	(7,7%)	(2,7%)	(0,3%)	(0,0%)
Vídeo (AC_VI)	8	0,28650	0,50950	0,79135	0,92107	0,97256	0,99716	0,99974
	16	0,14974	0,28331	0,50371	0,66744	0,78377	0,91532	0,96934
	Δ	(47,7%)	(44,4%)	(36,3%)	(27,5%)	(19,4%)	(8,2%)	(3,0%)
Best-effort (AC_BE)	16	0,14974	0,28331	0,50371	0,66744	0,78377	0,91532	0,96934
	32	0,07650	0,14893	0,28173	0,39881	0,50087	0,66388	0,78007
	Δ	(48,9%)	(47,4%)	(44,1%)	(40,2%)	(36,1%)	(27,5%)	(19,5%)

de janela adequado à sua densidade. Ou seja, as chances de colisão aumentam abruptamente quando a rede consegue melhor eficiência e são reduzidas paulatinamente quando começa a haver colisões. Sendo assim, ao utilizar janelas iniciais maiores, pode-se minimizar esta instabilidade, em razão de que, além de menos ampliações de janela após falhas, há menos faixas de expansão. Isto ocorre porque, ao iniciar com uma janela maior, o mecanismo atinge o tamanho máximo (CW_{max}) com uma iteração a menos. Contudo, optou-se por não medir individualmente cada uma destas contribuições menores.

Por outro lado, ao avaliar os aspectos negativos do alargamento das janelas, verificou-se que o **EICW** não ocasiona os atrasos que ocorrem nas demais propostas que sugerem tal aumento. A redução dos *slots* ajusta os intervalos na proporção inversa do alargamento e, portanto, os dispositivos iniciam suas transmissões no mesmo espaço de tempo empregado antes da ampliação das janelas. Com isto, os privilégios que os dispositivos legado teriam ao permanecer com janelas menores acabam sendo compensados pela redução dos *slots* nos novos dispositivos com as janelas alargadas. Sendo que estes, com mais *slots*, passam a contar com uma pequena vantagem em relação ao legado, pois se aproveitam de mais oportunidades de transmissão no mesmo espaço de tempo. Contudo, esta vantagem está relacionada com a proporção de dispositivos operando com o **EICW** versus a quantidade de equipamentos legado no mesmo canal. Pois, quanto mais dispositivos utilizando o novo método, menor será a vantagem, ao passo que será inexistente se todos operarem da mesma forma.

4.4.3 Comparação com Outros Modelos

O modelo proposto nesta seção pode ser comparado com os tradicionais modelos usados para analisar as redes 802.11, descritos na Seção 3.1. Tomando-se como base o conjunto de ideias proposto em [Bianchi, 2000], a hipótese pode ser simplificada através da desativação do aumento exponencial das janelas (Eq. 3.4) e, com isto, a chance de colisão τ pode ser calculada para cada tamanho de janela, eliminando-se a probabilidade condicional (Eq. 3.3). Desta forma, associa-se a probabilidade de colisões com a densidade da rede e a largura da janela de contenção, como demonstrado na Equação 4.6. E, com isto, os resultados obtidos através dos modelos tradicionais podem ser comparados com as probabilidades calculadas usando o modelo aqui apresentado,

previamente apresentado na Equação 4.5. Isto posto, apesar das diferentes abordagens, verifica-se notável similaridade entre as estimativas alcançadas em ambos os métodos, ilustrada na Figura 4.4. Os resultados equivalentes corroboram as conclusões encontradas na pesquisa.

$$P_c = 1 - \frac{n \left(\frac{2}{CW} \right) \left(1 - \frac{2}{CW} \right)^{(n-1)}}{1 - \left(1 - \frac{2}{CW} \right)^n} \quad (4.6)$$

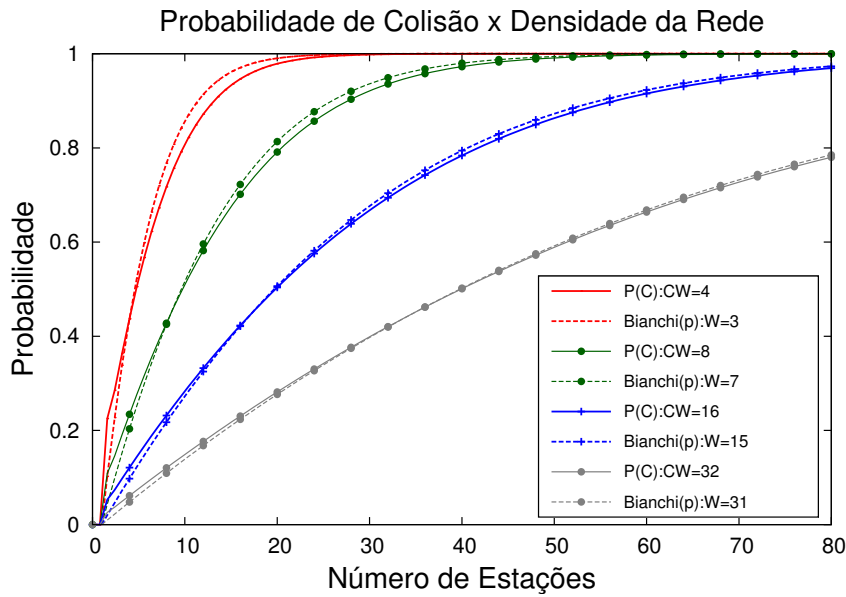


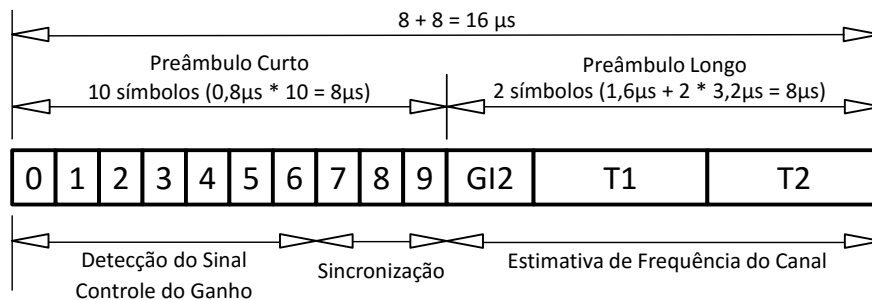
Figura 4.4: Comparação entre o modelo de Bianchi (4.6) e o proposto em (4.5)

Os modelos analíticos explicam a influência da largura das janelas de contenção e esclarecem porque o problema das colisões agrava-se com o aumento do número de nós na mesma rede. Com o **EICW**, a curva da probabilidade de colisões em cada tamanho de janela é esticada para a sua próxima faixa, reduzindo assim as taxas de colisão e o desperdício de tempo. Logo, a eficiência do canal e sua capacidade de transferência agregada devem aumentar. Contudo, os modelos retratam parcialmente a realidade, fixando um momento estático e eliminando as mudanças ocasionadas pelas variações no perfil de tráfego. Todavia, a cada instante, dispositivos entram e saem do conjunto que concorre pelo acesso ao canal. Por conseguinte, as atividades de análise prosseguiram através de ferramentas que permitem avaliar a proposta ao longo de um período, utilizando simulações, cujos resultados estão nos próximos capítulos. Antes, porém, é importante avaliar outros requisitos funcionais que tornam o **EICW** possível.

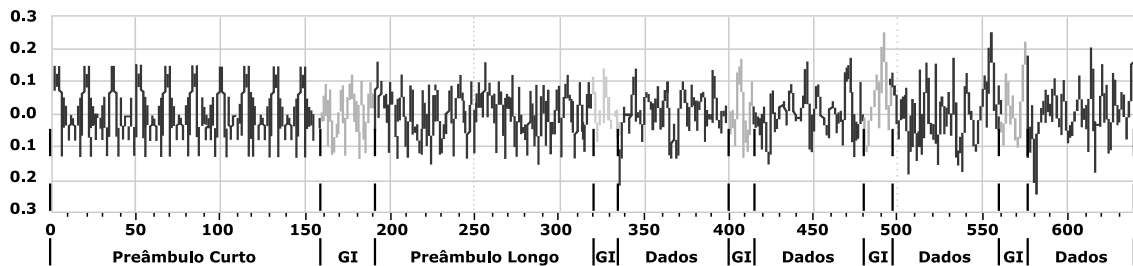
4.5 Requisitos de *Hardware*

A viabilidade do **EICW** depende da evolução do *hardware* para que os processos que atualmente são feitos em um intervalo de um *slot* passem a ser feitos em metade deste tempo. Porém, até o momento, este trabalho concentrou-se no modelo lógico, presumindo que o *hardware* é capaz de entregar os resultados no intervalo proposto. Embora não se tenha o objetivo de especificar o conjunto de componentes físicos necessários para implementar o protocolo,

Para exemplificar, considere-se que para efetuar a sincronização com as transmissões em curso, os nós devem realizar a detecção do sinal do preâmbulo do quadro, tipicamente consistindo de uma sequência repetitiva de símbolos conhecidos. Nos quadros transmitidos por OFDM, o cabeçalho contém uma sequência curta de símbolos destinados a detecção e sincronização, ocupando $8\mu\text{s}$ do preâmbulo (Figura 4.6). Atualmente, o processo de verificação de canal deve definir se este está ocupado utilizando apenas cinco dos dez símbolos do campo, em um intervalo de $4\mu\text{s}$ quando operando em 20MHz [IEEE, 2012]. E, em um *slot* reduzido pela metade, este mesmo processo terá que ser feito com apenas dois símbolos. Contudo, caso o *hardware* fosse capaz de reconhecer cada um destes símbolos com precisão, apenas um seria suficiente e, uma vez detectado, o nó entraria em processo de recepção e interromperia o *backoff* imediatamente.



(a) Modelo lógico - adaptado de [Ramachandran e Roy, 2005]



(b) Representação do sinal - adaptado de [Agilent Technologies, 2008]

Figura 4.6: Estrutura dos preâmbulos em uma rajada OFDM

Não obstante, no item 18.3.10.6 da vigente emenda do padrão 802.11, há outro método para definir se o canal está em uso quando a detecção do preâmbulo falha ou não é possível, como no caso do canal estar ativo por transmissões em outras modulações não suportadas pelo nó. Este item define o método de verificação do canal pela **detecção de energia**, considerando-o ocupado caso a energia medida esteja 20dB acima da sensibilidade mínima para a modulação e a taxa de codificação. Com isto, o mecanismo conta com duas formas de tomar a decisão. E, apesar de menos preciso do que a detecção do preâmbulo, o método de detecção de energia é mais rápido, pois o tempo para efetuar uma simples medição da energia no canal é relativamente curto. Sendo assim, a verificação da disponibilidade do meio pode ser viável com um intervalo de *slot* reduzido, mesmo que a sua execução dependa das implementações do *hardware*. Ademais, algumas pesquisas com redes 802.11 têm alcançado uma precisão de apenas $1\mu\text{s}$, utilizando a plataforma aberta WARP [Aryafar et al., 2013]. Embora com outras finalidades, estas pesquisas indicam que é possível obter funções processadas em intervalo menor que o requisito de $3,5\mu\text{s}$.

Quanto ao consumo de energia, o fato do **EICW** manter as janelas de contenção com a mesma duração deve garantir que o custo energético não sofra alterações. Apesar da escuta do canal utilizar procedimentos exigentes em termos de energia, os modelos que permitem medir ou estimar o seu custo energético baseiam-se na duração do *backoff* e dos demais processos do CSMA/CA [Zanella e De Pellegrini, 2004]. Logo, como o **EICW** utiliza

os mesmos métodos de detecção do canal ocupado (CCA) já presentes no padrão 802.11, sem ampliar os intervalos de escuta, presume-se que, a princípio, mantenha o mesmo custo energético. Além do mais, vários estudos apontam que colisões aumentam o custo energético por causa das retransmissões [Bononi et al., 2001, Tsao e Huang, 2011]. Sendo assim, ao reduzir a probabilidade de colisões, o **EICW** contribui para redução do custo energético do mecanismo.

Entretanto, a velocidade e os custos de processamento do *hardware* não são os únicos fatores a serem alcançados para viabilizar o **EICW**. As imperfeições na verificação do canal precisam ser superadas, minimizando a ocorrência de falsos positivos. O padrão 802.11-2012 exige uma eficácia de 99% para o CCA quando utilizando *slots* de $20\mu s$. Este mesmo índice é tolerado em 90% nas modulações que utilizam o menor *slot*, com duração de $9\mu s$, conforme exposto na Tabela 4.4. Obviamente, a redução do intervalo de medição para detecção do canal ocupado deve influenciar a capacidade do *hardware* de entregar medições precisas. Porém, os processadores e os processos evoluíram extraordinariamente desde 1999 quando estes parâmetros foram estabelecidos na emenda 802.11a para que o padrão suportasse a multiplexação por divisão de frequência ortogonal (OFDM). Este deve ser um fator-chave para viabilizar o encurtamento dos *slots* no padrão 802.11ax.

Tabela 4.4: Desempenho na verificação do canal - item 19.4.7 da [IEEE, 2012]

Parâmetro	Duração do Slot = $20\mu s$	Duração do Slot = $9\mu s$
SlotTime	$20\mu s$	$9\mu s$
RxTxTurnaroundTime	$5\mu s$	$5\mu s$
CCA_Time	$15\mu s$	$4\mu s$
CCA_Detect_Probability	>99%	>90%

Conforme demonstrado no estudo em [Ramachandran e Roy, 2005], caso haja aumento das imperfeições na verificação do canal, colisões tardias podem ocorrer e impactar na sua eficiência. Embora não sejam objeto desta pesquisa, pois, como esclarecido na Seção 2.4.2, este tipo de colisão não é intrínseco ao processo de *backoff*, a possibilidade de intensificação de tais colisões deve ser considerada ao desenvolver um *hardware* que opere com *slots* reduzidos. Todavia, como levantado na Seção 3.5, ao melhor do nosso conhecimento, não há um modelo que permita estimar o quanto estas imperfeições poderiam impactar no comportamento das redes do padrão 802.11. Além do mais, como a questão depende da implementação do *hardware*, também não é possível ter convicção de que tal problema ocorreria. Sendo assim, neste estudo, optou-se por considerar um cenário ideal, mantendo a probabilidade de detecções do CCA de acordo com os requisitos da norma (Tabela 4.4), assumindo que o *hardware* pode alcançar tal desempenho.

4.6 Questões em Aberto

Embora os ajustes de *hardware* pareçam um desafio prestes a ser superado, outras questões em aberto surgem durante o planejamento para implementar o **EICW**. Os estudos descritos na Seção 3.4 sobre as consequências do uso de *slots* menores são exemplos destas questões. Há, também, uma indagação sobre a vantagem que os novos dispositivos obtêm utilizando janelas maiores. Certamente, o maior número de oportunidades de transmissão alcançado pelos equipamentos com **EICW** proporciona-lhes um privilégio sobre o legado e causa desequilíbrio nas oportunidades de acesso em redes heterogêneas. Contudo, a proporção desta vantagem não é conhecida e, portanto, não se pode afirmar o quanto impacta nos critérios de compatibilidade. No entanto, estima-se que este benefício seja pequeno, conforme

sugerido pelos autores, o que incentiva a atualização e, ao mesmo tempo, permite a sua coexistência [Hiertz et al., 2015]. Logo, explorando estas possibilidades, busca-se responder a algumas destas questões nesta pesquisa.

4.7 Comparações e Extensões

Uma vantagem adicional do **EICW** sobre os demais protocolos de acesso ao meio está no fato de que este pode ser combinado com outras soluções encontradas na literatura. Como visto na Seção 3.6, as demais propostas para redução de colisões esbarram na compatibilidade com o legado. Porém, se todos os equipamentos no mesmo conjunto de serviços operarem sob o mesmo padrão, no caso o 802.11ax, então a questão da compatibilidade deixa de ser um problema. Logo, nesta situação, alteram-se os critérios para escolha da melhor solução. Sendo assim, além de avaliar o potencial do **EICW**, buscou-se compará-lo com os outros protocolos candidatos para a nova emenda, analisando-os individualmente e em conjunto. Os protocolos escolhidos para esta apreciação foram o **CSMA/ECA** e o **TDuCSMA**, que foram elegidos porque combinam técnicas de ajuste dinâmico de janelas com métodos baseados em divisão de tempo.

4.7.1 Protocolo CSMA/ECA

O protocolo **CSMA/ECA**, do inglês *Carrier Sense Multiple Access with Enhanced Collision Avoidance*, utiliza um método de *backoff* determinístico em que a divisão de tempo ocorre através de cada intervalo de *slot*. Embora o primeiro acesso aconteça de forma aleatória, os acessos posteriores mantêm o seu ponto de entrada na janela de contenção, esquivando-se das posições utilizadas pelos demais dispositivos. A proposta inicial era denominada *Learning-BEB* e consistia em uma asserção híbrida entre os métodos CSMA e TDMA, em que o sistema aprende qual o intervalo de tempo que pode efetuar um acesso ao meio, conforme ilustrado na Figura 4.7. A partir desta premissa, caso ocorra uma falha de transmissão percebida pela ausência do ACK, o protocolo busca por outro *slot* de forma randômica até que todos os dispositivos encontrem seus *slots* de entrada, quando o sistema converge para um estado sem colisões [Barcelo et al., 2009]. As versões posteriores incluíram mecanismos para controlar as ampliações e reduções do tamanho das janelas, em um processo de histerese, em que as variações dependem uma das outras, evitando mudanças bruscas na probabilidade de colisões ao mesmo tempo que procura manter as janelas pequenas [Sanabria et al., 2016].

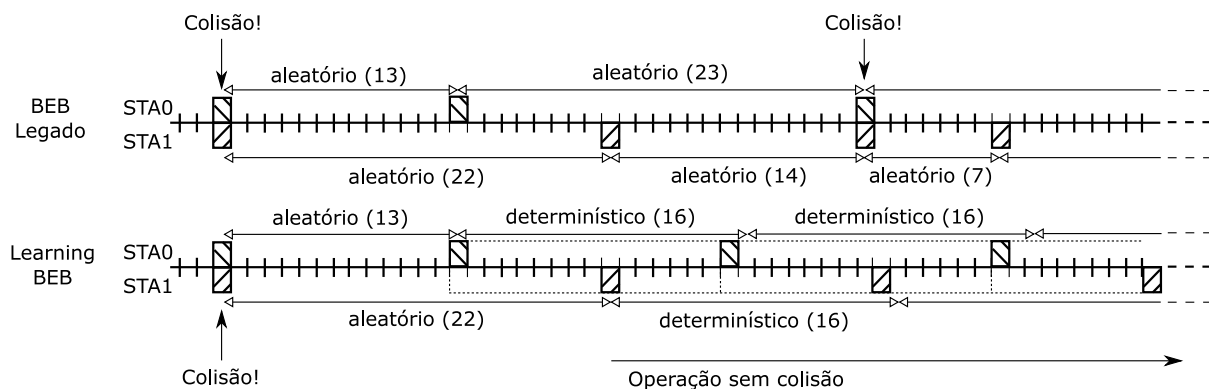


Figura 4.7: Comparação entre o BEB e o Learning-BEB [Barcelo et al., 2009]

Exemplificando, na Figura 4.8 tem-se uma amostra do comportamento do **CSMA/ECA** em condições ideais, em que quatro estações estão envolvidas em uma disputa para acessar o canal.

As linhas horizontais representam o tempo e são compostas por *slots* vazios e transmissões. A cada *slot* vazio, a contagem do *backoff* é decrementada em um *slot*. Logo, os números indicam quantos *slots* vazios são deixados até o final da contagem regressiva de cada estação. No primeiro *slot*, a figura aponta que as estações 3 e 4 escolheram o mesmo *slot* no *backoff* aleatório e eventualmente colidiram. Após a colisão, as duas estações recomeçam seus *backoffs* aleatórios até que uma delas seja capaz de fazer uma transmissão bem-sucedida. Neste momento, ela muda para um *backoff* determinístico enquanto as demais ficam impedidas de usar o *slot*. Neste caso, a estação 4 transmite com êxito e ajusta suas próximas transmissões para uma janela com oito *slots*, repetindo o acesso no *slot* escolhido a cada ciclo. Em teoria, uma vez que todas as estações passam para este modo determinístico, então o agendamento dos acessos atinge um estágio livre de colisões [Sanabria et al., 2014b]. Entretanto, em ambientes reais, interferências externas podem causar colisões, incluindo aquelas causadas por nós operando em modo legado.

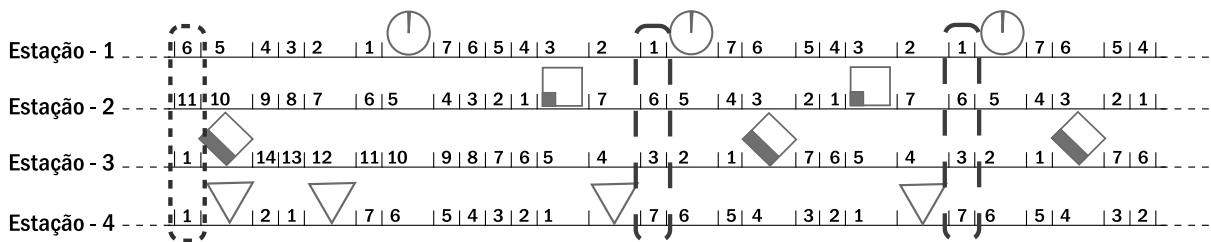


Figura 4.8: CSMA/ECA configurado com quatro estações [Sanabria et al., 2014b]

4.7.2 Protocolo TDuCSMA

O protocolo **TDuCSMA**, do inglês *Time Division Unbalanced Carrier Sense Multiple Access*, utiliza a coordenação do ponto de acesso para definir intervalos de tempo em que uma determinada estação é priorizada. O coordenador determina qual terminal poderá reduzir ao máximo o tamanho das suas janelas, alternando qual estação recebe este benefício a cada intervalo. Por exemplo, um ciclo de 100ms (*Time Cycle*) pode ser dividido em dez intervalos de 10ms (*Time Frames*). Cada intervalo é alocado para uma estação e, durante o período alocado, somente o nó selecionado pode transmitir sem contenção. Com isto, utilizará o menor AIFS enquanto os demais continuam aplicando a contenção normal do BEB, conforme ilustrado pela Figura 4.9. A decisão sobre o acesso é mantida no CSMA/CA, pois o novo mecanismo é implementado sobre a arquitetura do 802.11. Contudo, ao garantir que apenas uma estação de cada vez terá acesso sem contenção, este protocolo assegura uma taxa de transferência constante e reduz as colisões nas estações priorizadas [Vesco e Scopigno, 2009].

Entretanto, a coordenação do processo e a sincronização dos dispositivos são questões em aberto, uma vez que não está certo como os coordenadores em redes vizinhas devem evitar sobreposições. A precisão dos relógios de cada terminal é outro fator que pode afetar a sua viabilidade. Testes em pequena escala, utilizando protótipos, obtiveram bons resultados transmitindo dados de aplicações de voz, vídeo e elásticas com o **TDuCSMA** [Vesco et al., 2014]. No presente trabalho, consideram-se superadas as pendências relacionadas com a sincronização de dispositivos, pois há propostas específicas sobre isto no contexto do TGax [Aboul-Magd et al., 2016] que vão adiante do escopo desta pesquisa, com outros objetivos além da redução de colisões.

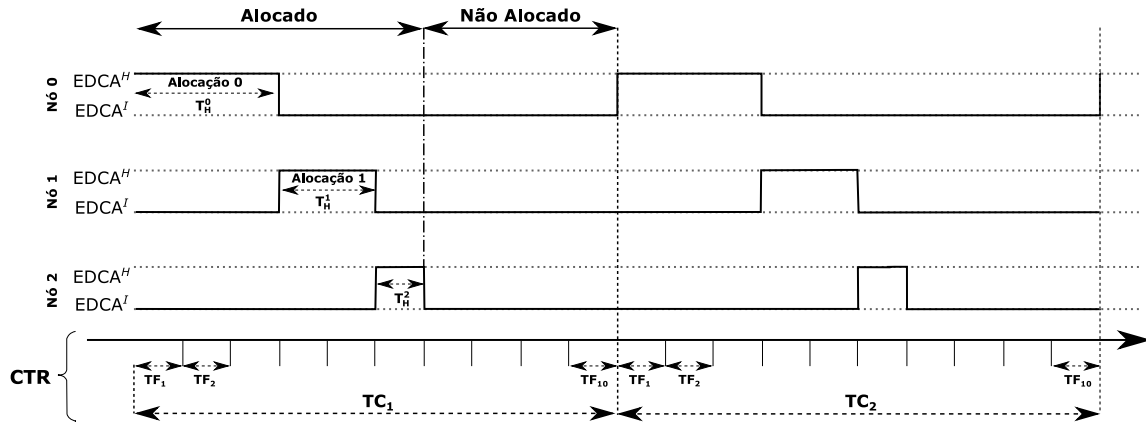


Figura 4.9: Alternância entre modo priorizado ($EDCA^H$) e normal ($EDCA^I$) [Vesco et al., 2014]

4.8 Resumo

Este capítulo descreveu a método de **alargamento das janelas de contenção através da redução dos slots, EICW**, sugerido para o padrão 802.11 com o objetivo de mitigar colisões e, assim, melhorar o desempenho destas redes. O seu funcionamento é baseado na alteração de parâmetros do corrente mecanismo de acesso ao meio e impacta no processo de verificação do canal. A sua viabilidade, portanto, depende da evolução do *hardware* para atender os requisitos que um *slot* menor impõe. As vantagens previstas indicam que a mudança reduz a probabilidade de colisões, o que é desejável principalmente em redes densas, onde este problema tem maior impacto. Um modelo matemático foi proposto para calcular a probabilidade de colisões, mensurando os ganhos pretendidos com o método. Ademais, levantou-se a possibilidade de combinar o **EICW** com outras soluções para que seus efeitos sejam ampliados.

Capítulo 5

Metodologia e Implementação

Este capítulo descreve a pesquisa exploratória realizada sobre a parametrização sugerida pelo **EICW**. Visando confirmar ou refutar as conclusões da análise matemática e da discussão preliminarmente realizadas e apresentadas na seção anterior, o estudo seguiu a linha experimental. Em laboratório, ambientes de rede com diversas densidades foram simulados, aplicando as mudanças sugeridas de forma controlada e medindo a sua influência no ambiente. O texto, a seguir, discorre sobre os métodos empregados, sobre a implementação dos experimentos, sobre os primeiros resultados obtidos e sobre o ajuste fino das simulações e demais recursos utilizados na avaliação das soluções propostas.

5.1 Ambiente da Simulação

O comportamento do processo de *backoff* tem sido amplamente caracterizado através de modelos matemáticos, como, por exemplo, o modelo desenvolvido para analisar o problema das colisões na Seção 4.4 ou os demais modelos citados na Seção 3.1. Todavia, não há consenso sobre uma equação de ponto fixo que determine a probabilidade de colisões em todos os cenários [Dai e Sun, 2013]. A quantidade de fatores que podem interferir no processo aumenta em demasia a complexidade dos modelos e exige uma ferramenta mais adequada. Sendo assim, as propostas que são objeto deste estudo foram avaliadas através de simulações, o que permite obter dados mais concretos, com diferentes tipos de tráfego e contextos.

O mecanismo proposto no **EICW** foi reproduzido e avaliado através do simulador de eventos discretos **ns3** [NS-3 Consortium, 2011]. Esta ferramenta foi escolhida pela sua ampla utilização em estudos voltados para sistemas de Internet. O seu código é aberto, baseado nas linguagens C++ e Python e suporta os protocolos de redes sem fio que são objeto desta análise. Além do mais, o código está disponível para pesquisadores, permitindo a implementação das mudanças sugeridas e possibilitando a inclusão de funções para coleta de dados e a aplicação das métricas selecionadas para a avaliação. Com isto, os experimentos desenvolvidos nesta pesquisa podem ser reproduzidos e validados pela comunidade acadêmica e demais interessados.

O simulador **ns3** foi alterado para inclusão de novos monitores ou rastreadores com o objetivo de melhorar a coleta de dados. Um **monitor de colisões** foi inserido através de uma extensão da classe `YansWifiPhy`, responsável pelo processamento da camada física. Esta mudança adicionou dois rastreadores, um para cada tipo de colisão. O contador `PhyNormalCollision` foi criado para medir apenas as colisões dentro do intervalo de um *slot* e as demais colisões foram contadas pelo `PhyLateCollision`. Desta forma, o monitor de colisões pôde distinguir aquelas causadas por falhas no CCA daquelas que são normais e inerentes do processo de *backoff*.

Em ambos os casos, o critério para identificar uma colisão foi a chegada de quadros na fila de entrada enquanto o nó já estava processando a recepção de outro quadro.

De forma semelhante, para diferenciar os tipos de descartes de quadros, foram inseridos dois rastreadores na classe `WifiMacQueue`, responsável por coordenar as filas da camada de enlace. Assim, o contador `FullQueueDrop` passou a relatar os quadros descartados por causa de *buffer* cheio, enquanto o `PacketTimeoutDrop` cuidou dos quadros descartados porque expirou o tempo máximo de permanência na fila. Com isto, foi possível diferenciar os tipos de perdas, distinguindo aquelas causadas por sucessivas falhas de transmissão (`MacTxErr`) daquelas causadas pela falta de oportunidade de transmissão, seja pelo congestionamento do canal ou de *buffers*. Estes monitores foram aplicados em todas as filas que separam o tráfego para o processamento do EDCA.

Os demais dados coletados durante as simulações utilizaram os rastreadores disponíveis na versão 3.24.1 do simulador, processando-os através de uma classe de estatísticas. As mudanças no tamanho dos *slots* foram implementadas alterando o correspondente parâmetro na classe `WifiMac` de cada nó e os tamanhos mínimo e máximo das janelas foram configurados nas classes `DcaTxop` e `EdcaTxopN`. O espaço arbitrário entre quadros (AIFS) também foi alterado desta forma. A geração de tráfego utilizou a classe de aplicações `OnOffApplication` do próprio simulador, configurada com parâmetros que simulam o tráfego típico de Internet, detalhado na Seção 5.1.2. E os registros de *logs* e gráficos no formato *Gnuplot* foram gerados através de funções embutidas no simulador. A Figura 5.1 ilustra o traçado desta implementação.

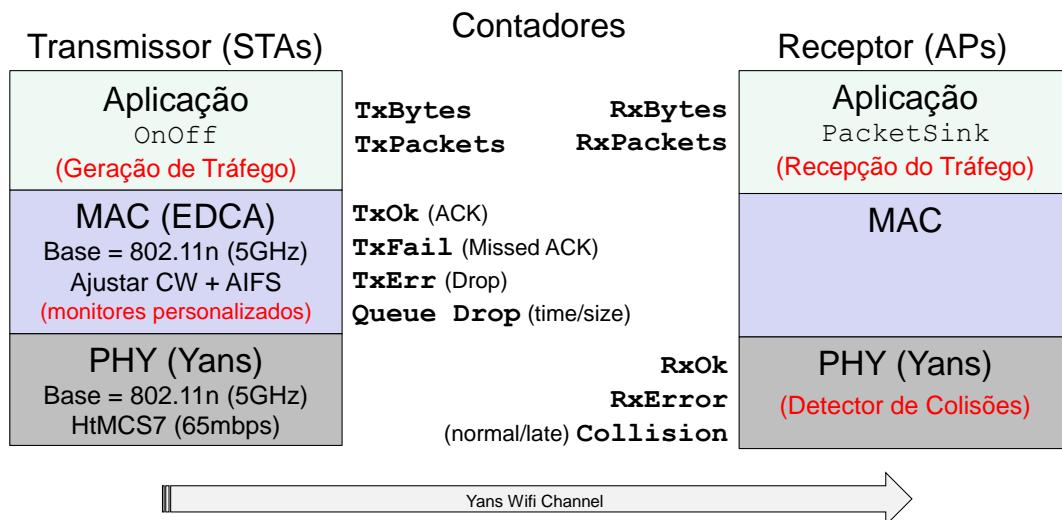


Figura 5.1: Contadores utilizados por camada no simulador ns3

5.1.1 Cenários

O trabalho buscou explorar cenários distintos, medindo o desempenho de redes com densidades variadas, partindo de dois a cinquenta dispositivos em um mesmo canal. Assim, investigou-se as hipóteses levantadas no capítulo anterior, sobre as grandezas pertinentes à redução das colisões, com a aplicação do **EICW**, do **CSMA/ECA** e do **TDuCSMA** em redes com estas quantidades de nós. A pesquisa teve caráter qualitativo, porém sem rejeitar a estratégia quantitativa. Uma vez que o ambiente simulado não consegue reproduzir totalmente um ambiente real, a avaliação concentrou-se nas deduções que os dados permitiram alcançar. Espera-se que, em maior ou menor grau, o comportamento observado nas simulações represente a realidade.

Os experimentos implementaram um cenário com dois pontos de acesso compartilhando o mesmo canal, afastados em vinte metros, com estações uniformemente distribuídas a dez metros dos seus pontos de acesso, conforme ilustrado pela Figura 5.2. O posicionamento equidistante das estações em cada BSS evita as distorções causadas pelo *efeito de captura* que privilegia os dispositivos situados mais próximos dos seus pontos de acesso [Ramakrishnan e Yang, 1994]. Os parâmetros de adaptação do canal e ajuste automático da taxa de transferência foram desabilitados, permanecendo constantes ou fixos em todos os equipamentos. Isto isola estas variáveis de controle, atendendo aos requisitos do método científico [Helland, 2010] e, também, previne as anomalias que são observadas em ambientes com diversidade nas taxas de transmissão [Duda et al., 2008], uma vez que estão fora do escopo deste trabalho. A opção por redes *single-hop* infraestruturadas pretendeu reproduzir o panorama dominante de redes sem fio para acesso à Internet. Os demais parâmetros seguiram o padrão 802.11n, base para o 802.11ax, com modulação e esquema de codificação MCS7 (64-QAM) para dados e MCS0 (BPSK) para controle na camada física. Por fim, os intervalos de envio de *beacons* foram ajustados em 100ms, como é característico neste tipo de rede.

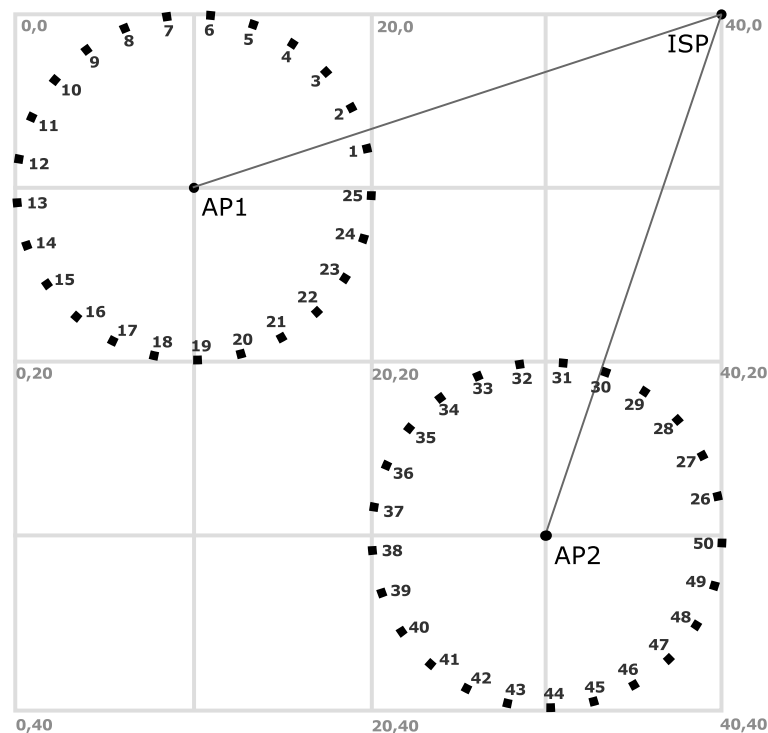


Figura 5.2: Cenário da simulação - ordenamento dos dispositivos

As estações enviaram fluxos de dados UDP para suas bases com uma geração de tráfego do tipo ON/OFF em períodos de 50ms em média, de acordo com uma distribuição de Pareto, similar aos modelos que representam o tráfego Web típico predominante em *hotspots* WiFi públicos [Divgi e Chlebus, 2013]. Primeiramente, os experimentos foram executados com as duas opções da função de proteção RTS/CTS. No entanto, não houve diferença significativa nos resultados das medições, uma vez que o cenário não contém terminais ocultos e todos os nós estão dentro do alcance. Logo, todos os dispositivos foram parametrizados para não utilizarem esta proteção, resguardando-se da sobrecarga causada pelos quadros de controle. Ponderou-se, ainda, o fato de que esta é a configuração padrão na maioria dos sistemas, observando que o usuário comum não costuma alterar as configurações de fábrica.

De forma similar, o tamanho dos pacotes foi configurado com duas opções: 256 e 1000 bytes. Logo, as filas da camada de enlace foram ajustadas com um limite de mil quadros ao usar pacotes maiores e quatro mil quadros quando utilizando pacotes menores. Isto corresponde ao tamanho de *buffer* de 1Mb tipicamente encontrado nos dispositivos de mercado [Geier, 2010]. Os primeiros resultados mostraram um comportamento equivalente, independentemente da opção. Todavia, observou-se que o uso de quadros maiores entrega melhores taxas de transferência, o que é justificado pela menor sobrecarga com cabeçalhos e quadros de controle ao agregar mais dados em um mesmo pacote [Hajlaoui et al., 2013]. Sendo assim, optou-se por continuar os experimentos usando apenas quadros de 1000 bytes. Além do mais, o tamanho dos quadros foi mantido constante, evitando que a sua variação pudesse causar algum impacto nas medições.

Os demais parâmetros permaneceram com o valor padrão e o experimento foi realizado variando três atributos: o tipo de tráfego, a saturação do canal e o uso da solução proposta, conforme ilustrado na Tabela 5.1. Portanto, ao todo foram avaliados 24 contextos distintos formados pela combinação destes critérios. Quanto aos diferentes **tipos de tráfego**, as medições foram realizadas com transferências de dados exclusivamente de voz (AC_VO), tão somente de vídeo (AC_VI) ou apenas quadros não prioritários (AC_BE). Também foi utilizada uma opção mista em que cada estação enviou quadros de um destes três tipos. Quanto ao **volume de tráfego**, as análises foram realizadas de duas formas: em um contexto de canal saturado, com o total de tráfego gerado em 100 Mbps e outro não-saturado, com o total de tráfego no canal em 36 Mbps. Por fim, o ensaio foi realizado alternando os diferentes **mecanismos de acesso**. Primeiro, com todas as estações operando com *slots* de $9\mu s$ e janelas conforme o padrão atual (*baseline*). Depois, com todas operando com *slots* de $4,5\mu s$ e janelas alargadas da forma como está sendo proposto no **EICW**. E, por fim, com metade das estações em cada uma destas opções.

Tabela 5.1: Características variáveis nos cenários

Tipo de Tráfego		Situação do Canal		Mecanismo
Voz	x	Saturado Não Saturado	x	EICW
Vídeo				Legado
<i>Best Effort</i>				50/50
Misto				

Estes mesmos cenários também foram utilizados na segunda fase de experimentos, quando o **EICW** foi comparado com os protocolos **TDuCSMA** e **CSMA/ECA**. Os autores do último disponibilizaram o código-fonte das suas simulações no **ns3** [Sanabria et al., 2014a] e, servindo-se disto, o código foi adaptado para ser aplicado no presente estudo. Já o outro protocolo foi implementado conforme descrito pelo autor [Vesco et al., 2014], presumindo que as estruturas de sincronização das estações com o ponto de acesso funcionam perfeitamente. Portanto, os três protocolos foram avaliados sob as mesmas condições, mantendo-se as mesmas características em todos os parâmetros externos, alterando apenas as estruturas que os diferenciam.

5.1.2 Métricas

A quantidade de colisões foi medida em cada um dos cenários e situações, tendo sido apurada através da função detectora de colisões e, com isto, a **taxa de colisões** foi calculada em relação ao total de quadros recebidos (Eq. 5.1). Os resultados deste índice ficaram bastante próximos da **taxa de erros de transmissão**, obtida pela quantidade de quadros enviados sem o retorno da respectiva confirmação (Eq. 5.2). A diferença pode ser explicada pela

colisão de mais de dois quadros e também pela colisão de quadros de difusão, como *beacons*. A **taxa de transferência** foi auferida pela quantidade de *bytes* recebidos pela aplicação em seu destino (Eq. 5.3). As métricas foram coletadas diferenciando os nós conforme o cenário e o tipo de tráfego, utilizando os parâmetros do ambiente de simulação, descrito na Seção 5.1.

$$\text{Taxa de Colisões} = \frac{\text{Número de Colisões Normais}}{\text{Quadros Recebidos}} \quad (5.1)$$

$$\text{Taxa de Erros} = \frac{\text{Quadros sem Resposta (missed ACK)}}{\text{Quadros Transmitidos}} \quad (5.2)$$

$$\text{Taxa de Transferência} = \frac{\text{Bytes Recebidos}}{\text{Duração / Tempo}} \quad (5.3)$$

Além das taxas de colisões e taxas de transferência, outras métricas foram coletadas nos experimentos e auxiliaram a análise. Ao todo foram utilizados treze contadores descritos na Tabela 5.2, que resultaram em doze taxas ou índices descritos na Tabela 5.3. Estas métricas permitiram acompanhar o processamento dos quadros nas camadas de aplicação, física e de enlace conforme ilustrado na Figura 5.1. Através delas, as perdas ou descartes de quadros foram mensurados em diferentes partes do processo para identificar possíveis pontos de falha, e a vazão e o atraso foram quantificados para avaliar o desempenho. Adicionalmente, o índice de Jain foi utilizado para comparar as diferentes oportunidades de acesso dos dispositivos em um cenário misto e para avaliar sua equidade [Jain et al., 1999].

Tabela 5.2: Contadores observados nas simulações

Contador	Tipo	Descrição
appTxBytes	padrão	Tráfego gerado pela aplicação, em bytes.
appTxPackets	padrão	Tráfego gerado pela aplicação, em quadros.
appRxBytes	padrão	Tráfego recebido pela aplicação, em bytes.
appRxPackets	padrão	Tráfego recebido pela aplicação, em quadros.
macTxOk	padrão	Quadros de confirmação recebidos (received ACK).
macTxFail	padrão	Quadros sem respectiva confirmação (missed ACK).
macTxErr	padrão	Quadros descartados após limite de retransmissões.
macQueueFull	custom.	Quadros descartados por causa do buffer cheio.
macPktTimeout	custom.	Quadros descartados pelo limite máximo de espera.
phyRxOk	padrão	Quadros recebidos sem erros pela camada física.
phyRxErr	padrão	Quadros recebidos com erro pela camada física.
phyNormalColl	custom.	Colisões durante o primeiro slot de uma recepção.
phyLateColl	custom.	Colisões após o primeiro slot de uma recepção.

A última e talvez a mais importante métrica utilizada no experimento foi a **densidade da rede**. A quantidade de dispositivos tentando transmitir simultaneamente no mesmo canal foi utilizada como base para analisar o comportamento das demais métricas dentro de um intervalo de uma a cinquenta estações. Considerando que os dispositivos podem ser distribuídos entre pontos de acesso operando em diferentes canais, pode-se avaliar o comportamento do mecanismo em apenas um canal e estendê-lo aos demais. A quantidade de canais disponíveis varia conforme

Tabela 5.3: Taxas e índices observados nas simulações

Métrica	Descrição
collRate	Total de colisões / Total de quadros transmitidos.
throughput	Bytes recebidos pela aplicação / segundo.
phyRxErr	Quadros recebidos com erro / Total de quadros recebidos.
macTxFail	Quadros sem confirmação / Total de quadros enviados.
macPktTimeout	Quadros descartados por timeout / Total de quadros enfileirados
txPktLoss	Quadros descartados por falhas / Total de quadros enfileirados.
macPktLoss	Quadros descartados nas filas / Total de quadros enfileirados.
macQueueFull	Quadros descartados por fila cheia / Total de quadros gerados.
genPktLoss	Quadros descartados / Total de quadros gerados.
meanDelay	Atraso médio em milisegundos dos quadros recebidos.
fairnessIdx	Índice de Jain para medir a equidade no acesso ao meio.

a legislação de cada país, mas há dezenas de canais disponíveis na faixa de 5 MHz. Sendo assim, pode-se obter uma rede local com mais de mil usuários com apenas vinte canais de cinquenta usuários, e mais de cinco mil usuários se utilizados todos os canais desta faixa.

5.2 Extensões no Simulador NS3

Dois módulos foram adicionados ao simulador de redes **ns3**. O primeiro efetuou os procedimentos de coleta de dados e composição das métricas, sendo denominado *Statistics*, e o segundo alterou o simulador para realizar a detecção de colisões na camada física, atuando sobre a classe *YansWifiPhy*. Com isto, os instrumentos usados para as medições foram configurados e o cenário-base foi preparado. Em seguida, implementou-se a parametrização do **EICW** e efetuou-se o processamento da simulação e a coleta de dados. Posteriormente, na segunda fase, os demais protocolos foram implementados e processados. O código-fonte e os arquivos de dados com as métricas coletadas foram disponibilizados através do serviço de compartilhamento *DropBox* em [Da Silva, 2016]. O projeto foi publicado sob uma licença pública (GNU) para que possa ser reproduzido e validado por outros pesquisadores. As próximas seções proporcionam uma visão geral sobre as estruturas elaboradas para a realização dos experimentos.

5.2.1 Detector de Colisões

O detector de colisões foi implementado sobre a classe *YansWifiPhy*, que é a responsável pela camada física das redes do padrão 802.11 no simulador. Conforme descrito nas seções anteriores, este monitor serviu para identificar as colisões que são inerentes ao processo de *backoff*. Considerando que o **ns3** baseia-se em eventos, a nova classe *CollisionDetectorWifiPhy* alterou a função que trata a recepção dos preâmbulos dos quadros (*StartReceivePreambleAndHeader*), adicionando uma checagem que examina se o canal já está em uso quando ocorre um evento de chegada de um novo quadro. Caso positivo, verifica o atraso e dispara um gatilho de colisão normal se este for menor que a duração de um *slot*, ou um gatilho de colisão tardia se for maior, conforme detalhado no Algoritmo 1. Com isto, as ferramentas empregadas no experimento

conseguem distinguir as colisões pelo seu tipo, focando apenas naquelas que são características do processo de *backoff* que é objeto do estudo.

Algoritmo 1: INICIE RECEPÇÃO PREÂMBULO CABEÇALHO

```

Entrada: QuadroRecebido
1  início
2      se RSS é forte o bastante para ser decodificado então
3          se EstadoAnterior = RX então
4              atraso ← AGORA() – INICIOÚLTIMARECEPÇÃO()
5              timeout ← DURAÇÃO SLOT()
6              se atraso < timeout então
7                  DISPAREGATILHO(PhyNormalColl)
8              senão
9                  DISPAREGATILHO(PhyLateColl)
10             fim
11         fim
12     fim
13     YansWifiPhy.INICIE RECEPÇÃO PREÂMBULO CABEÇALHO(QuadroRecebido)
14 fim

```

5.2.2 Classe de Estatísticas

Seguindo uma prática comum encontrada em projetos do simulador **ns3**, este trabalho implementou um módulo de estatísticas para criar e processar os contadores e métricas citadas na Seção 5.1.2. Neste módulo, todos os contadores são ativados a partir de monitores disponíveis na ferramenta, que disparam gatilhos acionando as funções de contagem. No **ns3** estes monitores são chamados de *traces* e a Tabela 5.4 lista aqueles que foram utilizados no experimento. Entretanto, após uma avaliação preliminar, constatou-se que o **ns3** não fornecia *traces* para medir as filas da camada de enlace, o que dificultava a descoberta da causa dos descartes. Por este motivo, dois rastreadores foram adicionados no módulo *WifiMacQueue*, responsável por manter as filas do EDCA no processo de *backoff*. O contador *macQueueFull* passou a ser ativado pela função *Enqueue*, acionada ao receber os quadros que a aplicação deseja enviar. Caso o *buffer* que armazena a fila esteja cheio, o contador é incrementado e o quadro é descartado. Este recurso permite distinguir os descartes causados por falhas de transmissão, inclusive colisões, daqueles motivados por simples sobrecarga dos *buffers* nos cenários saturados. E, de forma similar, o contador *macPktTimeout* foi implementado sobre a função *Cleanup*, responsável por remover das filas os quadros que atingiram o limite máximo de tempo para envio. Com isto, foi possível ajustar os parâmetros de geração de tráfego para níveis mais adequados ao problema em estudo.

As taxas citadas na Tabela 5.3 foram alcançadas combinando os dados dos contadores. Adicionalmente, o atraso médio foi obtido pelo assistente *DelayJitterEstimation*, que marca uma etiqueta de tempo em cada quadro a ser enviado e obtém a sua latência ao processar a recepção no destinatário. Por conseguinte, a marcação e a apuração da latência ocorrem acima da camada de enlace, na camada de aplicação, provendo taxas de transferência neste nível, ou seja, aferindo o *goodput*. Logo, os resultados expressos nas medições englobam o processo de *backoff*, o que não seria possível se fossem utilizados contadores atuando apenas a partir da camada física. Além do mais, marcações de quadros foram usadas para identificar cada tráfego pelo seu tipo e origem, permitindo determinar o índice de Jain, que expressa a equidade da

rede [Jain et al., 1999]. Por fim, a classe de estatísticas também foi responsável por totalizar e armazenar os dados obtidos em cada amostra, calculando média, desvio padrão e intervalo de confiança, por salvar os arquivos de dados em formato acessível (texto) e por gerar scripts que produzem gráficos através do utilitário **Gnuplot** [Williams e Kelley, 1986].

Tabela 5.4: Rastreadores utilizados para coleta de dados

Rastreador	Contador	Descrição
OnOffApplication/Tx	appTxBytes	Após criar cada quadro na aplicação
OnOffApplication/Tx	appTxPackets	Após criar cada quadro na aplicação
PacketSink/Rx	appRxBytes	Ao receber um quadro de dados na aplicação
PacketSink/Rx	appRxPackets	Ao receber um quadro de dados na aplicação
RegularWifiMac/TxOkHeader	macTxOk	Ao receber um quadro de confirmação (ACK)
RSM/MacTxDataFailed	macTxFail	Após o tempo limite para receber um ACK
RSM/MacTxDataFailed	macTxErr	Após descarte por atingir limite de retransmissões
Phy/State/RxOk	phyRxOk	Ao receber um quadro sem erros na camada PHY
Phy/State/RxError	phyRxErr	Ao receber um quadro com erro na camada PHY

5.2.3 Parametrização do EICW

O principal ajuste feito no **ns3** para implementar o **EICW** foi a alteração da classe **WifiMac**, que é a base para a camada de enlace dos dispositivos da rede WiFi no simulador. Nesta classe, a simples mudança dos atributos que regulam o tamanho das janelas de contenção efetua o seu alargamento conforme proposto no **EICW** (CW_{min} e CW_{max} em $DcaTxop$ e $EdcaTxopN$). O mesmo procedimento também permite estabelecer o **AIFS** para que as janelas permaneçam alinhadas. Além disso, a duração do *slot* deve ser ajustada na classe **WifiNetDevice**, que é a responsável pela coesão das estruturas de rede sem fio do simulador (canal, camada física e gerenciador de estados). Consequentemente, o simulador **ns3** passa a gerar os eventos nos tempos em que devem ocorrer ao aplicar o **EICW**, definidos de acordo com os parâmetros de *slot* reduzidos e janelas alargadas.

5.2.4 Parametrização dos Demais Protocolos

Os outros protocolos utilizados no experimento para comparação com o **EICW** foram posteriormente adicionados ao simulador de duas formas distintas. O protocolo **CSMA/ECA** havia sido avaliado em outro estudo, cujos autores disponibilizaram o código-fonte de suas simulações [Sanabria et al., 2014a] e, portanto, este recurso foi reaproveitado neste ensaio. Já o protocolo **TDuCSMA** foi implementado inserindo um evento de configuração no **ns3** que chama a função **SetupTDuCSMA**. Esta função mantém uma lista de nós que fazem parte dos dispositivos que aplicam o protocolo, ativando a priorização da próxima estação cada vez que é chamada, ao mesmo tempo que desativa o recurso no nó selecionado anteriormente. E, após configurar as janelas de contenção dos nós envolvidos, a função agenda a sua própria execução para o próximo intervalo, ajustados em *Time Frames* de 10ms, com um ciclo de tamanho suficiente para que cada estação obtenha um período de priorização.

5.2.5 Implementação dos Cenários

O último passo na construção do experimento consistiu em posicionar os dispositivos de rede, configurando-os conforme descrito na Seção 5.1.1. Os detalhes da codificação estão documentados no próprio código-fonte e seguem uma organização típica deste tipo de simulação. A distribuição dos processos nos servidores foi realizada através de scripts que dividiram a carga e repassaram os argumentos para a execução de cada parte. Os dados foram agrupados conforme os cenários propostos, separando as medições conforme o tipo e o volume de tráfego, assim como o mecanismo usado. O posicionamento dos nós e a geração de tráfego foram conferidas através do utilitário NetAnim e dos arquivos de rastreamento gerados (*traces*). Deste modo, buscou-se garantir fidedignidade ao trabalho, assegurando o rigor científico necessário para a avaliação do experimento, cuja análise dos dados obtidos está relatada a partir das próximas seções.

5.3 Calibração e Validação

Com o objetivo de efetuar um ajuste fino das configurações, as primeiras sequências de testes foram amplamente monitoradas para identificação da conformidade com o planejado. As rodadas iniciais motivaram alguns dos ajustes já citados, relativos aos tamanhos dos *buffers* e dos quadros e à customização dos monitores das filas. Empiricamente, foi aplicada uma geração de tráfego de 54 Mbps por estação, buscando um cenário de canal saturado. Embora os resultados tenham mostrado uma perda de quadros muito maior do que o esperado, acima de 90%, após implementar o monitoramento das filas foi possível identificar os motivos dos descartes. Em consequência, notou-se que a maior parte deles ocorria por *buffer* cheio, antes mesmo que estes chegassem ao mecanismo de *backoff* em avaliação. Todavia, as aplicações costumam consultar o estado dos *buffers* antes de enviarem seus dados, ajustando o volume de acordo com a capacidade do mecanismo. Por isso, o montante de tráfego gerado foi reduzido para 100 Mbps por canal, o suficiente para saturá-lo sem sobrecarregar os *buffers* em demasia, porém atendendo ao requisito de manter as filas sempre com algum quadro pendente para transmissão, o que caracteriza um cenário saturado neste ambiente [Baldo et al., 2010].

Contudo, a definição de um cenário não-saturado exige mais quesitos, pois é possível gerar um volume de dados igual à capacidade de transmissão, mantendo as filas sempre com algum quadro a ser transmitido, mas sem a ocorrência de perdas. Nesta situação ideal, obter-se-ia a máxima vazão sem que houvesse sobrecarga ou exaustão do canal. Logo, para diferenciar um cenário saturado de um não-saturado, algumas pesquisas consideram que deve haver algum tipo de perda que indique a sobrecarga do canal, como o aumento da latência ou o descarte de quadros e o seu respectivo impacto na qualidade [Shih e Lin, 2004, Podolanko et al., 2014]. Sendo assim, este estudo considerou que o canal está saturado quando há perdas por limite de tempo na fila ou perdas por atingir o número máximo de retransmissões. Por conseguinte, considerou a ausência destes indicadores para caracterizar um canal não-saturado. Baseado neste conceito, foram realizados testes de calibração do experimento com diferentes volumes de tráfego, obtendo o ápice de vazão sem perdas quando a aplicação ON/OFF foi ajustada para uma geração de tráfego com um volume máximo de 36 Mbps.

A mudança nestes volumes, utilizando uma geração de 100Mbps no cenário com canal saturado e 36Mbps no cenário não-saturado, reduziu a quantidade de tempo necessária para processar a simulação. E isto ocorreu sem influenciar os principais resultados sobre as métricas de desempenho do mecanismo de acesso, descritas na Seção 5.1.2. Não obstante, o intervalo das amostras foi o parâmetro que mais pesou no tempo total de processamento. As rodadas de simulação com amostras acima de um minuto demandavam várias horas de processamento

em CPUs Intel™ Xeon™ X5680 @ 3.33 GHz. Contudo, os resultados destas amostras eram similares aos obtidos com as amostras de apenas dez ou vinte segundos, ajustadas as proporções. Isto posto, a duração das amostras foi fixada em dez segundos, o que demandava quinze minutos de processamento para cada medição. Todavia, sendo necessária uma execução para cada uma das cinquenta densidades dos vinte e quatro cenários, o tempo total de processamento de toda simulação ficaria em cerca de doze dias.

Além do mais, ainda durante a análise das primeiras rodadas de simulação, ficou claro que as amostras utilizando janelas de contenção menores (voz e vídeo) apresentam muita instabilidade e grande variação nos dados coletados. Logo, para obter resultados mais precisos, cada amostra precisava ser coletada quarenta vezes, aplicando diferentes sementes geradoras de números aleatórios a cada repetição. Portanto, para viabilizar a solução, o código-fonte da simulação foi adaptado para processamento em paralelo, distribuindo-a em 44 CPUs e reduzindo o tempo total de execução para cerca de dez dias. Feito isso, mesmo com um processamento estatístico ajustado para um intervalo de confiança de 95%, as margens de erro passaram a apresentar valores aceitáveis nas métricas observadas, a serem detalhadas e analisadas no próximo capítulo. Adicionalmente, as implementações dos protocolos **CSMA/ECA** e **TDuCSMA** foram validadas com o objetivo de verificar se os resultados obtidos no ambiente de simulação deste estudo eram compatíveis com os resultados obtidos originalmente pelos seus autores. Os detalhes desta implementação foram relatados nos Apêndices A e B.

5.4 Resumo

Este capítulo apresentou uma descrição das simulações realizadas para avaliar a mudança sugerida pelo **EICW** no mecanismo de acesso ao meio das redes 802.11. A metodologia e as ferramentas utilizadas foram descritas, assim como as justificativas e os ajustes efetuados para atingir o objetivo. Os cenários e as métricas empregadas foram retratados e explicados. E o processo de avaliação foi pormenorizado. Além do mais, os arquivos-fonte do trabalho foram disponibilizados em repositório público. Portanto, espera-se que o experimento possa ser reproduzido e aprimorado pela comunidade acadêmica e demais interessados.

Capítulo 6

Resultados e Discussão

Este capítulo descreve e analisa os resultados das simulações processadas na pesquisa. Os trabalhos foram divididos em duas fases, uma para avaliar individualmente o método proposto pelo **EICW** e outra para compará-lo e mesclá-lo com as demais soluções elencadas. Os efeitos da combinação do **EICW** com as abordagens propostas pelos protocolos **CSMA/ECA** e **TDuCSMA** foram reportados na segunda fase. Em todas as etapas, discute-se como as propostas podem ser desenvolvidas e aprimoradas. O texto apresenta as métricas obtidas nos experimentos, através das simulações, e perfaz analogias que permitem obter conclusões sobre a influência dos protocolos no mecanismo de acesso, no que tange à mitigação de colisões e o seu impacto no desempenho das redes 802.11. Desta forma, este trabalho antecipa algumas das situações que devem ocorrer caso estas soluções sejam incluídas na próxima emenda 802.11ax.

6.1 Avaliação do EICW

A confrontação dos resultados obtidos no cenário base com os cenários propostos mostrou uma **redução nas taxas de colisões** em todos os tipos de tráfego, conforme ilustrado nas Figuras 6.1 e 6.2. O cenário-base (a) continha apenas dispositivos legado, operando no padrão 802.11n com *slots* de $9\mu s$, enquanto no principal cenário proposto (b), todas as estações aplicaram o **EICW**, dobrando as janelas de contenção e encurtando os *slots* para $4,5\mu s$. Com isto, observou-se que as taxas de colisão variaram conforme previsto, apresentando uma redução média em torno de 8% quando em um canal saturado e 11% no contexto não saturado. A Figura 6.1 ilustra as medições feitas com o canal sobrecarregado. Nela, percebe-se que o resultado foi mais significativo para o tráfego prioritário, com uma redução na taxa de colisões entre 9 e 10%. Por outro lado, com o tráfego não prioritário houve uma redução menos expressiva, em média de 6%, o que é explicado porque este tipo de tráfego já contava com uma janela inicial maior. Contudo, quando o canal estava menos sobrecarregado, a redução nas colisões do tráfego prioritário manteve-se na mesma faixa enquanto para o não prioritário aumentou, ficando na casa de 11%, como visto na Figura 6.2.

Entretanto, o fato que mais chama a atenção está na redução ainda maior das colisões em um cenário misto (c), em que metade das estações opera com o **EICW** enquanto a outra metade permanece no modo legado. Neste caso, em média, o volume de colisões foi de 20 a 25% menor para o tráfego de voz e vídeo e entre 15 e 17% para o tráfego não-prioritário. Isto ocorreu por causa da vantagem obtida pelos nós operando com *slots* menores, deixando de concorrer com o legado em metade das oportunidades de acesso que tiveram (Figuras 6.1(c) e 6.2(c)). Consequentemente, conclui-se que a proposta consegue obter melhores resultados se aplicada com moderação. Logo, pode-se supor que uma forma de limitar a quantidade de

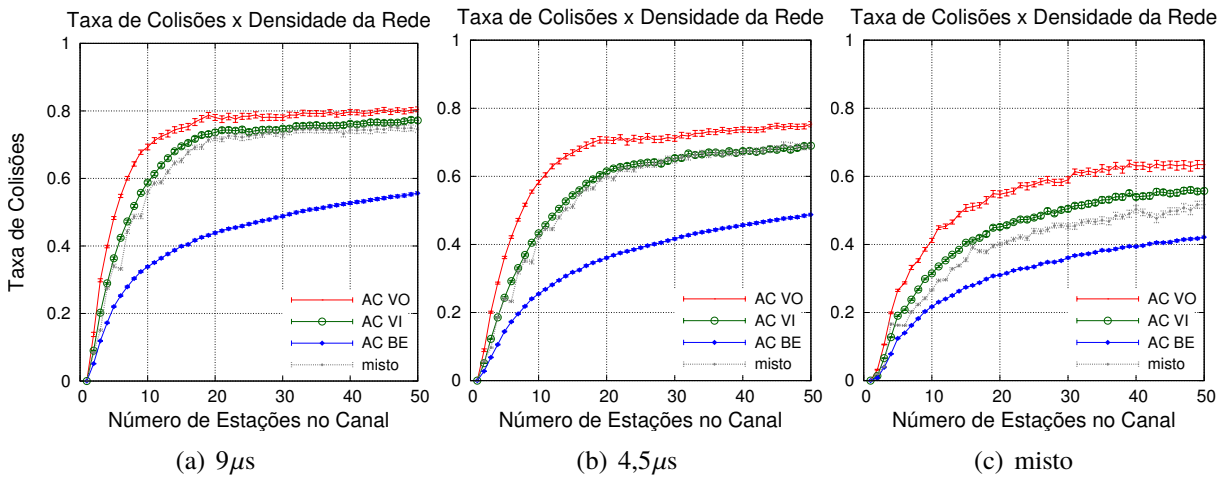


Figura 6.1: Canal saturado: taxa de colisões x densidade da rede

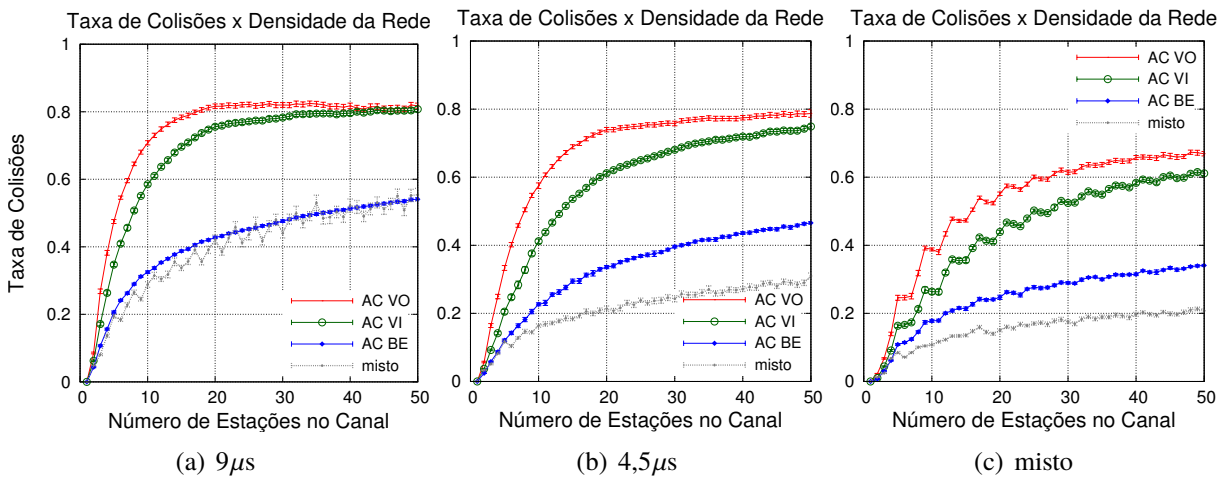


Figura 6.2: Canal não saturado: taxa de colisões x densidade da rede

estações operando sob este protocolo confere-lhe melhor eficácia quanto ao aproveitamento do canal. Contudo, em todos os ambientes e tipos de tráfego constata-se uma curva mais suave na taxa de colisões, aumentando menos à medida que a densidade cresce, confirmando a hipótese de que o **EICW** reduz as colisões, conforme descrito na Seção 4.3 .

As **taxas de transferência** refletiram a redução na taxa de colisões. O resultado foi mais expressivo nos perfis de tráfego prioritário, que passou a apresentar uma curva mais próxima do conteúdo não prioritário e melhor rendimento, conforme ilustrado pelas Figuras 6.3 e 6.4. A perda que normalmente ocorre ao utilizar uma janela inicial maior nas transmissões com poucos nós concorrentes foi eliminada pelo uso do *slot* menor. E, todos os tipos de tráfego apresentaram **aumento na vazão**, novamente com resultados mais significativos em ambiente misto, tanto no contexto do canal saturado quanto não saturado. Na média, ao comparar-se o cenário-base (a) com o proposto (b), os aumentos variaram entre 15 e 18% para o tráfego de voz, 18 a 24% para vídeo e 9 a 16% para o tráfego não-prioritário. E, assim como ocorreu com as taxas de colisão no cenário misto (c), as taxas de transferência aumentaram ainda mais neste contexto, entre 33 e 45% para o tráfego de vídeo e voz. Sendo assim, conclui-se que o aumento da taxa de transferência foi alcançado por causa do menor número de retransmissões, resultante da redução nas colisões. A queda na quantidade de erros de transmissão corrobora com esta

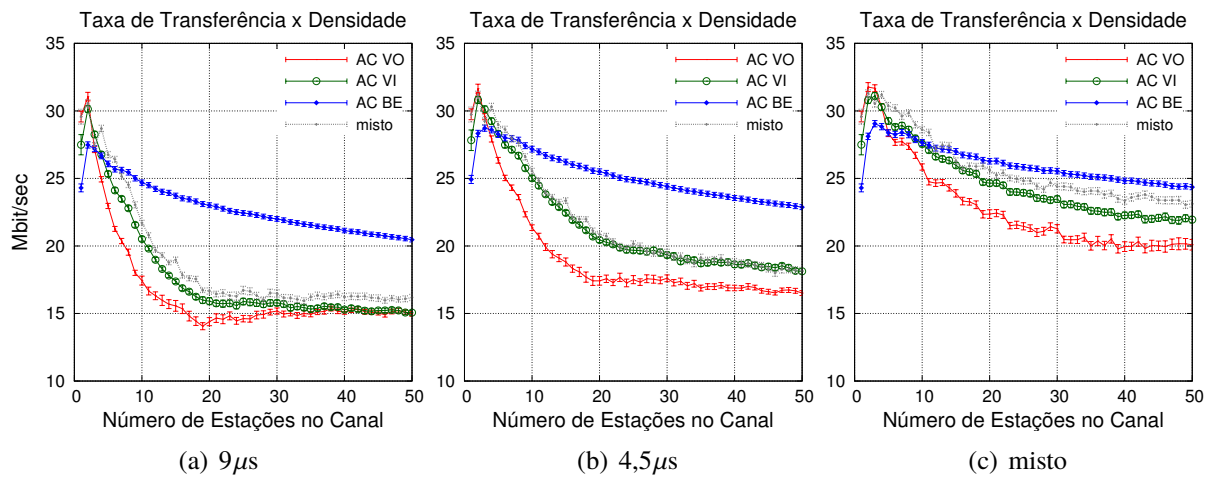


Figura 6.3: Canal saturado: taxa de transferência x densidade da rede

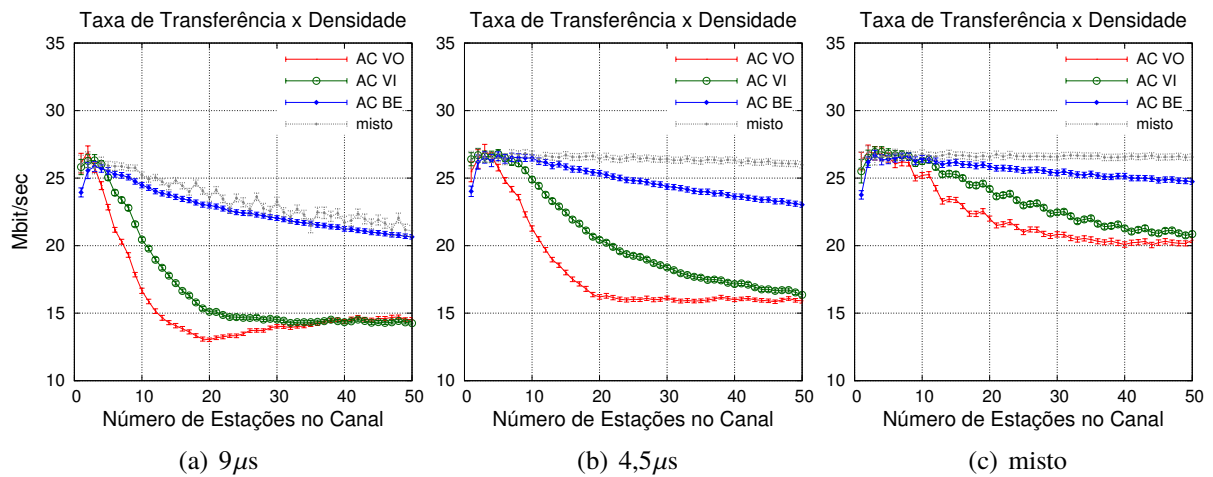


Figura 6.4: Canal não saturado: taxa de transferência x densidade da rede

dedução, conforme ilustrado na Figura 6.5. Isto denota a melhora na eficiência do aproveitamento do espectro, com mais oportunidades de envio e menos desperdício do tempo do canal.

Além do mais, ao analisar os resultados, percebe-se que independentemente do tipo de tráfego ou da saturação do canal, a redução de 9,2 para 4,6 segundos que ocorreu no tamanho máximo da janela (CW_{max} - Tabela 4.1) não comprometeu o resultado. Ou seja, foi insignificante o fato de haver uma iteração a menos na expansão das janelas, o que ocorre nos contextos com transmissões de dados não prioritários. Ademais, outro dado que chama a atenção é a diferença observada nos dados coletados com tráfego misto, pouco significativa no cenário saturado e mais expressiva no cenário não saturado. Como as filas de voz e vídeo têm prioridade, os resultados medidos com este tipo de tráfego ficaram mais próximos dos obtidos com voz e vídeo quando em um canal saturado e mais próximos do tráfego normal quando o canal está mais livre.

A observação dos **descartes de quadros** indicou que as suas causas são distintas entre o tráfego prioritário e o não-prioritário, tendo um comportamento cada vez mais diverso à medida que a densidade aumenta. Este fato é percebido ao comparar a contagem de quadros descartados pelo **limite de tempo** com a contagem dos quadros descartados pelo **limite de retransmissões**. Por exemplo, na Figura 6.6 percebe-se que o número de perdas que ocorrem ao atingir o máximo de retransmissões diminui entre 45 e 70% com *slots* menores e tráfego prioritário, sendo mais significativo no ambiente misto. Este descarte ocorre de acordo com o parâmetro

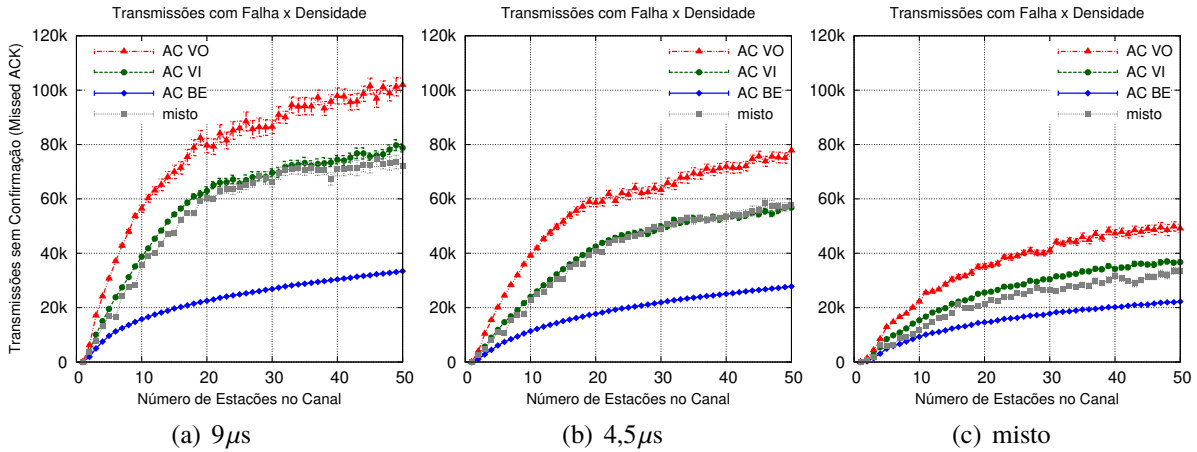


Figura 6.5: Quantidade de erros de transmissão x densidade da rede

dot11ShortRetryLimit da norma 802.11-2012, cujo valor padrão é de no máximo sete tentativas para cada quadro. Logo, as perdas acontecem após esta quantidade de falhas de transmissão, cujas prováveis causas são as transmissões simultâneas, visto que este comportamento é similar ao observado na taxa de colisão, ajustadas as devidas proporções.

Por outro lado, na Figura 6.7, observa-se que há um aumento nos descartes causados pelo limite de tempo na fila, porém apenas para o tráfego prioritário e em densidades maiores, principalmente no ambiente misto. Por padrão, este limite é de $500\mu s$, conforme definido na norma 802.11-2012, item 9.19.2.6. Ao permanecer na fila por um período maior do que este, o quadro é removido e descartado antes mesmo que atinja o limite de retransmissões. Presume-se que a redução de um tipo de perda ocorre em detrimento da outra, ou seja, com menos colisões e menos descartes por retransmissões, mais quadros permanecem nas filas e são descartados pelo seu tempo limite. E o fato das perdas por *timeout* serem maiores no ambiente misto deve-se ao desequilíbrio entre os diferentes tipos de dispositivos que acontece neste contexto, percebido anteriormente nas taxas de colisões.

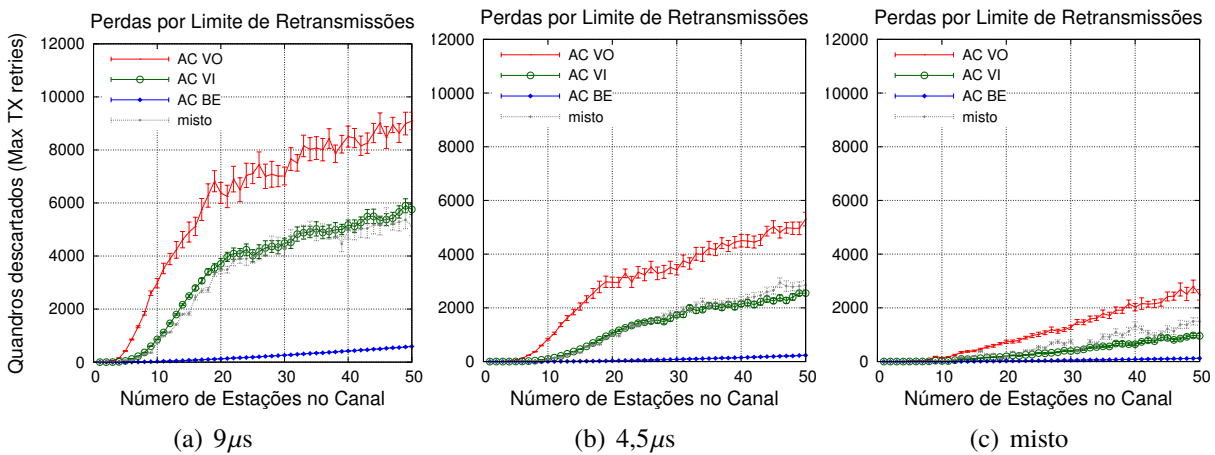


Figura 6.6: Canal saturado: descartes por retransmissões x densidade da rede

Em ambos os casos, denota-se que enquanto o tráfego prioritário de voz e vídeo termina rapidamente sua contagem do *backoff* ao atingir o tamanho máximo da janela, o tráfego não prioritário permanece contido nas filas, sendo descartado pelo limite máximo de permanência. Por outro lado, a principal causa das perdas no tráfego prioritário é o limite de retransmissões. Neste caso, como o volume de colisões e falhas é mais significativo, as tentativas de reenvio dos

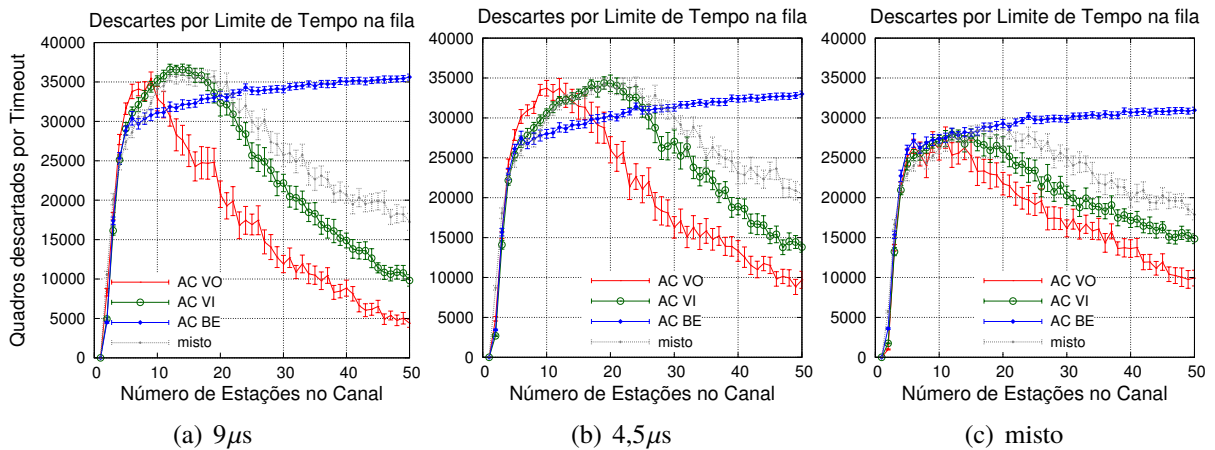


Figura 6.7: Canal saturado: descartes por *timeout* x densidade da rede

quadros chegam antes ao limite de falhas consecutivas. Apesar dos diferentes motivos para os descartes, conclui-se que a implementação do **EICW** não aumenta a perda de quadros, uma vez que promove a redução das retransmissões e o aumento da vazão.

O índice de Jain foi usado para avaliar as vantagens que dispositivos operando com *slots* menores têm sobre os demais operando em modo legado em um ambiente misto. Este índice mede a equidade nas oportunidades de acesso ao canal. Através da inclusão de um rótulo identificando os transmissores, os quadros recebidos foram separados e contados de acordo com a sua origem. Com isto, o índice foi calculado conforme descrito em [Jain et al., 1999]. Os resultados, expressos na Figura 6.8, mostram que no cenário misto há uma pior distribuição do acesso ao canal, sendo mais significativa quando os dispositivos utilizam janelas maiores. Os seja, com menos dispositivos tentando simultaneamente o acesso ao meio, percebe-se um ganho na redução das colisões e no aumento da taxa de transferência agregada. Porém, este benefício é acompanhado de um desequilíbrio nas oportunidades de acesso. Por conseguinte, para obter uma melhor noção dessa assimetria, as métricas de taxa de transferência foram analisadas separadamente, conforme apresenta a Figura 6.9. Os resultados mostram que os dispositivos operando com *slots* menores obtêm uma taxa de transferência quatro vezes superior às obtidas com os dispositivos legados.

Contudo, os nós operando com *slots* maiores não chegam a ser silenciados pelos demais, o que permite a sua coexistência, como pode ser visto pela equidade e pela taxa de transferência no cenário misto. Diferentemente das soluções baseadas em Canais de Controle ou Domínio de Frequência (Seção 3.3.1) que são incompatíveis com o padrão atual e omitem ou não permitem a inclusão do legado no processo de *backoff* proposto, o **EICW** apenas reduz o desempenho dos equipamentos que mantiverem seus tamanhos de janelas e *slots*, mas o legado continua operando.

Como descrito na Seção 5.3, o tamanho dos quadros pouco afetou o comportamento observado. As transferências com pacotes menores apresentaram maiores taxas de colisão tanto em *slots* de $9\mu s$ quanto com $4,5\mu s$, com pequena variação em tráfego não prioritário. Obviamente, a taxa de transferência é superior com pacotes maiores ou agregados, pois estes exigem menos quadros para obter a mesma vazão e, conseqüentemente, menos colisões. O atraso médio apresentou uma pequena variação, com uma redução nas densidades menores e aumento nas maiores, porém abaixo de $10ms$. Os descartes acabaram influenciando esta métrica, pois as filas são liberadas no limite do tempo de permanência (*timeout*) e novos quadros são transmitidos com menor atraso. Além do mais, a variação na duração das amostras também não afetou os resultados de modo significativo, apenas suavizou as curvas, porém manteve as mesmas tendências. Em todas

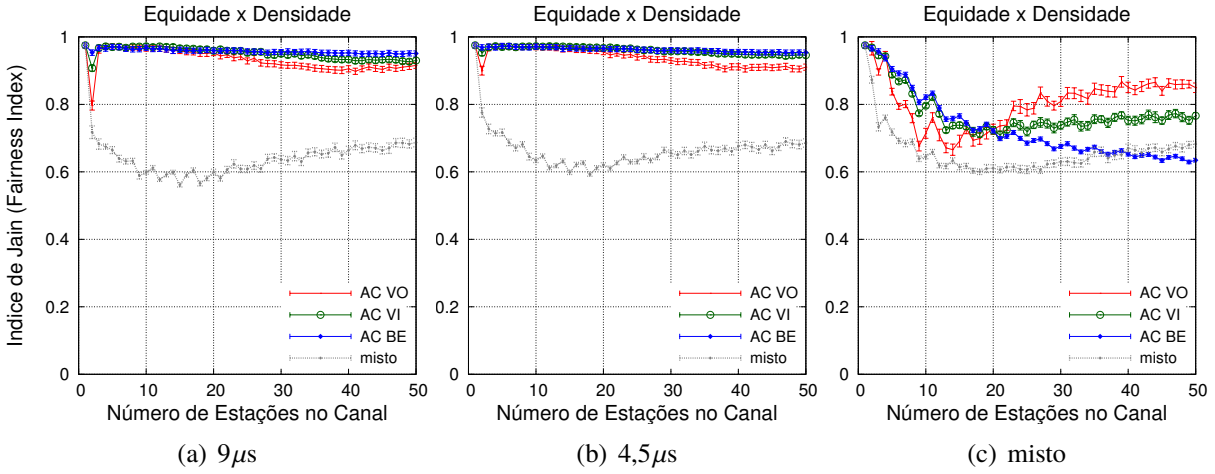


Figura 6.8: Índice de Jain obtido nos cenários com canal saturado

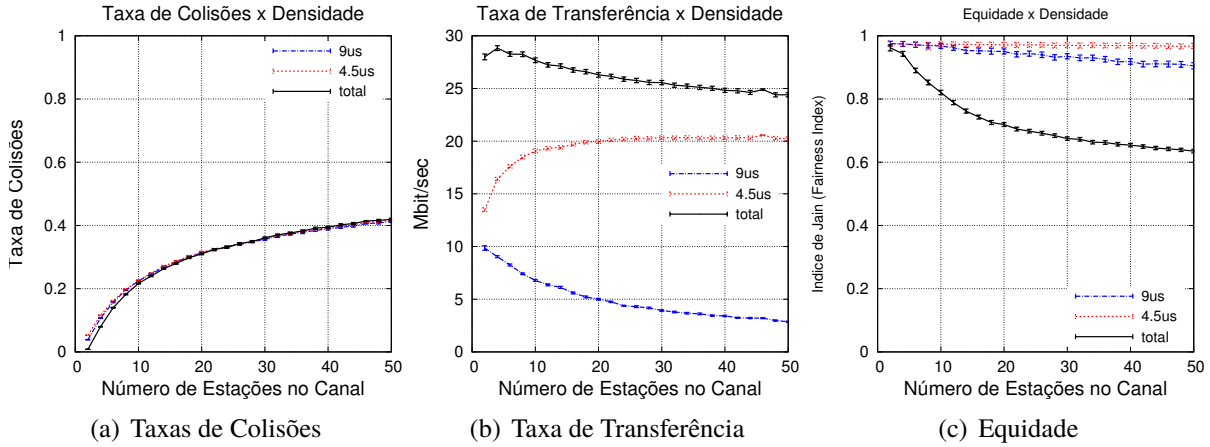


Figura 6.9: Dados do cenário misto separados pelo tipo do nó: $9\mu s$ = base e $4,5\mu s$ = EICW

estas nuances, os efeitos sobre a redução das colisões foram mais expressivos nas amostras em um **ambiente misto**, sendo significativamente melhores em relação ao desempenho do cenário-base, bem como no contexto em que todos os dispositivos aplicam o **EICW**.

6.1.1 Aprimorando o Protocolo EICW

Uma vez que os melhores resultados foram alcançados em um cenário misto, vislumbra-se a possibilidade de outras aplicações para estes novos *slots*, aplicando-se uma configuração mista. Por exemplo, alguns deles podem ser alocados para o tráfego prioritário ou para reserva de banda, utilizando uma nova regra de distribuição dos *slots*, de forma similar ao proposto em [Huang et al., 2014], em que um controlador de pontos de acesso é usado para determinar quem pode utilizar os recursos. Caso os novos *slots* sejam alocados apenas para o tráfego prioritário, obtém-se a vantagem de uma taxa de transferência maior ao aplicar o **EICW** exclusivamente sobre voz e vídeo, mas sem silenciar o tráfego não-prioritário, conforme observado na seção anterior. Efetivamente, limita-se o uso destes novos *slots* intermediários apenas para os dados mais importantes, introduzindo um mecanismo mais eficaz para o tráfego que mais sofre com as perdas de desempenho causadas por janelas muito curtas em ambientes densos.

Dentro do contexto exploratório da pesquisa, avaliou-se esta opção, identificando-a como **EICW+**, onde o alargamento das janelas e o encurtamento dos *slots* foram aplicados apenas quando os dispositivos enviam dados de categorias prioritárias, mantendo o atual processo do

802.11n para os dados normais. Com este objetivo, simulou-se um cenário de canal saturado, com uma geração de tráfego de 100Mbps, distribuído em 1% para voz, 40% para vídeo e o restante com dados normais, não prioritários. A Figura 6.10 mostra os resultados desta simulação. A redução média de 20% na taxa de colisões, obtida neste cenário com o **EICW**, foi ampliada para 40% com o **EICW+** ao priorizar apenas voz e vídeo na solução. Consequentemente, as taxas de transferência refletiram a melhora nas taxas de colisões, ampliando os aumentos de vazão, que passaram de 12 para 17% em média, chegando próximo ao dobro de ganho quando a rede é mais densa. Ou seja, com cinquenta estações, a taxa de transferência que havia sido ampliada em 13% com o **EICW**, aumentou este ganho para 25% com o **EICW+**, passando de 18,7 para 23,4 Mbps.

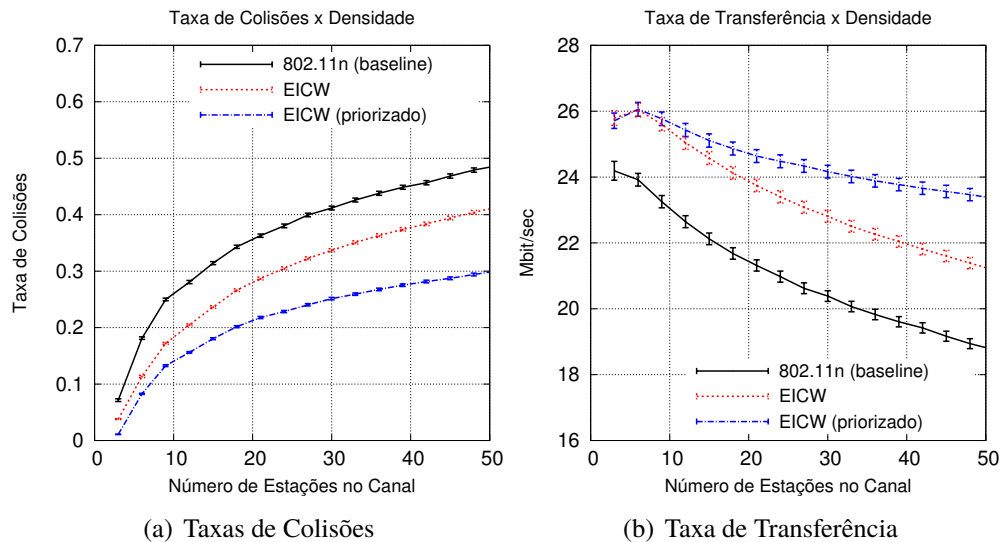


Figura 6.10: **EICW+** - aplicação do **EICW** apenas para o tráfego prioritário

Com efeito, entende-se que o momento é oportuno para inclusão de novas estruturas. Pois, caso não seja criado algum mecanismo de reserva, os equipamentos operando com o **EICW** passam a contar com essa vantagem no acesso ao canal somente enquanto houver dispositivos legado operando na mesma rede, portanto antes que todos os dispositivos sejam substituídos pelo novo padrão. Mas, caso todos estejam operando com os mesmos tamanhos de *slot* e de janela, os ganhos desta proposta não são tão significativos, sendo que novas reduções de *slots* podem ser inviáveis diante das limitações do *hardware* para processar o **CCA** em um intervalo tão curto.

6.2 Comparando soluções: **EICW**, **CSMA/ECA** e **TDuCSMA**

Os resultados da segunda fase de simulações mostram uma comparação entre a solução proposta pelo **EICW** e outros dois protocolos candidatos para as próximas gerações do 802.11: o **CSMA/ECA** e o **TDuCSMA**. Como eles permitem que seus processos sejam implementados em conjunto, explorou-se esta possibilidade dois a dois e também uma combinação dos três, além da avaliação de seus desempenhos individuais. Todas estas opções foram correlacionadas com uma linha de base, fomentada no atual padrão 802.11-2012. As métricas mostram que todas as propostas conseguem reduções na taxa de colisões. Porém, nem sempre esta redução reflete-se no aumento da vazão. Diferente do que foi observado no **EICW**, as demais soluções inserem algum atraso e não lidam muito bem com janelas curtas, como é o caso do tráfego prioritário. Contudo, a combinação destes protocolos com o **EICW** consegue potencializar os seus ganhos.

A Figura 6.11 mostra as taxas de colisões e de transferência dos três protocolos e de suas combinações, em um cenário com tráfego de voz (AC_VO). Observa-se que todos os protocolos são bem-sucedidos ao reduzir colisões em relação ao padrão 802.11n, que é a linha de base sobre a qual o 802.11ax foi estabelecido. No entanto, a redução do problema nem sempre resultou em melhorias na eficácia do canal, como pode ser visto pelas medições das taxas de transferência. As simulações que alcançaram estes resultados utilizaram os mesmos parâmetros e metodologia detalhados no Capítulo 5, exceto pela quantidade de nós que aumentou para 70 estações compartilhando o mesmo canal. Assim como na primeira fase, variou-se o número de estações para aferir a performance de cada protocolo à medida que o cenário torna-se mais denso. Além disso, os protocolos foram combinados em pares e em conjunto, com o propósito de verificar o quanto as soluções são intercambiáveis entre si. Ao comparar os resultados obtidos com dados de voz (Fig. 6.11) e com um perfil misto (Fig. 6.12), percebe-se que seus desempenhos estão fortemente relacionados com o tipo de tráfego, que por sua vez está diretamente associado ao tamanho das janelas, definido de acordo com as regras do **EDCA**.

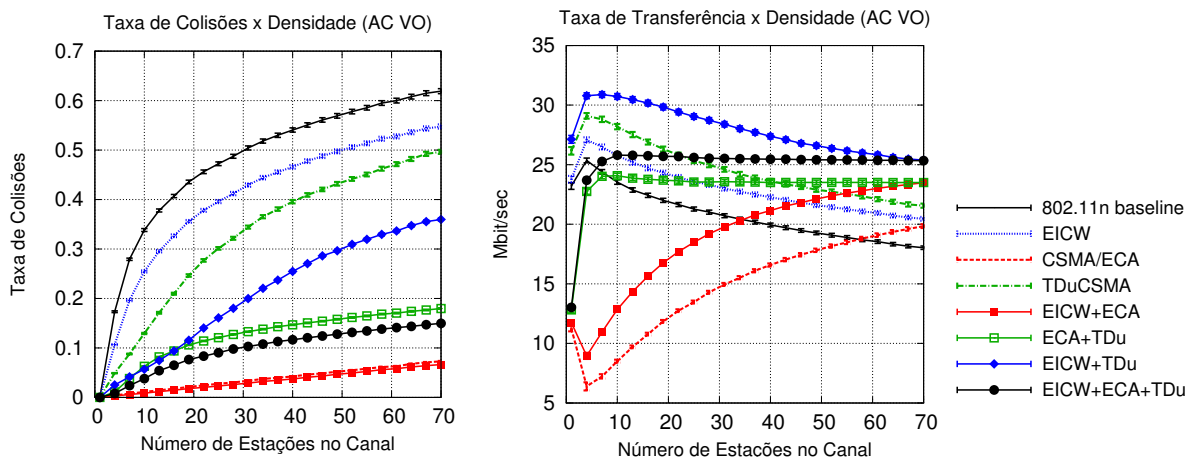


Figura 6.11: Taxa de colisões e taxa de transferência com tráfego de melhor esforço

Por exemplo, focando apenas no tráfego prioritário retratado pela categoria *AC_VO*, ao observar as taxas de colisão obtidas com protocolo **CSMA/ECA**, percebe-se uma redução de 90% em relação à linha-base do 802.11n, atingindo o melhor desempenho registrado na comparação com os demais protocolos neste quesito (Fig. 6.11). O ganho é praticamente o mesmo alcançado ao combinar o **CSMA/ECA** com o **EICW**, mas é pelo menos três vezes superior aos resultados obtidos com as demais soluções individualmente. Logo, espera-se que a tendência de melhora, vista nas taxas de colisões com este protocolo, cause um correspondente reflexo nas taxas de transferência. Porém, neste caso, a vazão observada foi menor do que a linha de base do 802.11n, indicando uma queda de desempenho, principalmente quando a densidade é menor. Portanto, conclui-se que, apesar de sua alta capacidade de mitigar colisões, o uso do *backoff* determinístico não alcança ganhos de performance na vazão da rede neste contexto. A provável hipótese para justificar este comportamento está no fato de que, neste tipo de solução, os dispositivos devem aguardar a contagem de determinado *slot* a cada ciclo, com apenas uma oportunidade de acesso a cada n slots da janela, resultando em maior ociosidade. Além do mais, quando o tráfego é prioritário e contempla dados de voz e vídeo, as janelas são menores e, portanto, há menos *slots* disponíveis para um *backoff* determinístico, resultando em descartes caso não seja possível acomodar todos os dispositivos em diferentes *slots* da janela de contenção. Logo, o desempenho do **CSMA/ECA** e de suas combinações não é tão satisfatório quando utilizado tráfego prioritário, por causa das perdas observadas na vazão.

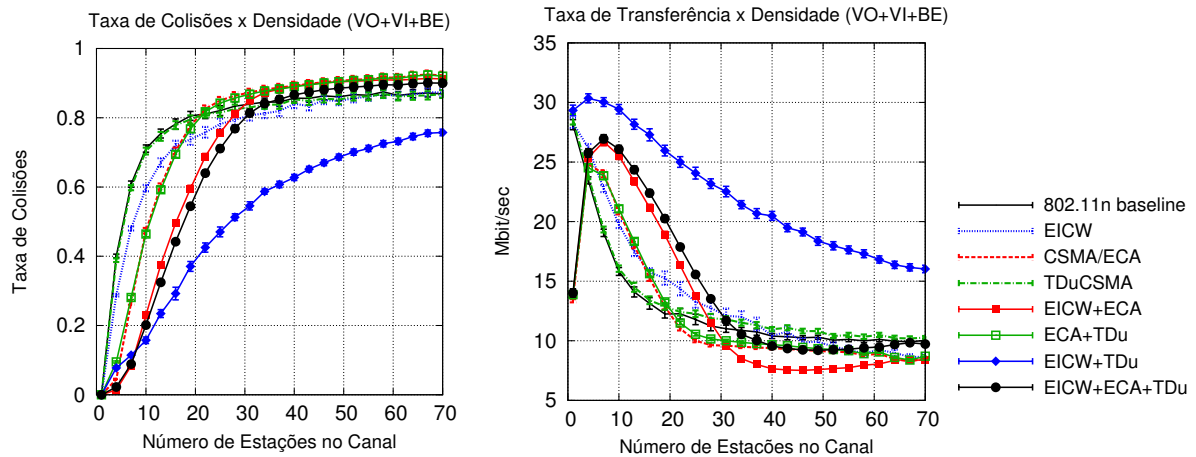


Figura 6.12: Taxa de transferência de cada proposta por tipo de tráfego

Por outro lado, tanto o protocolo **TDuCSMA** quanto o **EICW** apresentaram reduções nas taxas de colisões acompanhadas de aumentos de vazão em ambos os tipos de tráfego. Contudo, o **TDuCSMA** mostrou um resultado melhor no cenário com tráfego prioritário (Fig. 6.11), enquanto que o **EICW** foi melhor no cenário com tráfego misto (Fig. 6.12). Todavia, em ambos os casos, percebe-se que a combinação entre estas duas soluções resulta nos maiores ganhos de vazão, assim como na maior redução de colisões no cenário com tráfego misto. Enquanto o **TDuCSMA** garante um intervalo sem contenção para cada estação, o **EICW** proporciona a criação de mais *slots* e mais oportunidades de transmissão para as estações que não estão em seu intervalo prioritário. Desta forma, há uma potencialização do desempenho de ambos, atingindo um resultado maior que a soma de suas partes. Ou seja, enquanto o **EDCA** alcança uma redução média de 15% nas colisões e o **TDuCSMA** atinge 30%, a combinação de ambos alcança 56% de redução média na taxa de colisões no cenário com tráfego prioritário (Fig. 6.11). Apesar de menor, no contexto com tráfego misto esta é a única opção que se destaca, conforme pode ser visto na Figura 6.12. Tanto na mitigação das colisões quanto no aumento da vazão, em todas as densidades, a combinação do **EICW** com o **TDuCSMA** é a melhor opção neste cenário.

Contudo, não obtém-se o mesmo resultado ao combinar os três protocolos simultaneamente. Percebe-se que o **EICW** incrementa os ganhos das outras duas propostas, mas o **TDuCSMA** causa instabilidade no *backoff* determinístico usado pelo **CSMA/ECA** ao influenciar negativamente a convergência para um estado sem colisões. Isto é, o **TDuCSMA** força um novo processo de convergência a cada *frame* de tempo, impedindo a manutenção de um estado livre de colisões no **CSMA/ECA**. Além de que, como visto anteriormente nesta seção, nem sempre um protocolo sem colisões oferece o melhor desempenho, por causa da ociosidade que pode gerar. Embora os resultados observados possam variar de acordo com o volume e o tipo de tráfego, constata-se que o **EICW combinado com o TDuCSMA** obtém os melhores rendimentos na ampla maioria dos cenários avaliados, incluindo um panorama que contém alto volume de dados de vídeo, como é esperado no futuro próximo que o 802.11ax deverá atender.

6.2.1 Avaliando a Transição

A manutenção da compatibilidade com o atual padrão é um dos requisitos fundamentais do projeto do 802.11ax. Portanto, as soluções candidatas para este novo padrão devem suportar redes operando com dispositivos legado, permitindo a sua coexistência [Chun et al., 2013].

Sendo assim, avaliou-se o desempenho dos protocolos **EICW**, **TDuCSMA** e **CSMA/ECA**, assim como de suas combinações, em ambientes compartilhados com estações mantidas no padrão 802.11n. As simulações utilizaram os mesmos parâmetros e metodologia descritos no Capítulo 5, exceto pela quantidade de estações, que foi fixada em 70 equipamentos, variando a quantidade de dispositivos legados e novos a cada amostra. Os experimentos iniciaram com apenas um dispositivo aplicando a solução proposta enquanto todos os demais mantiveram o padrão 802.11n e terminaram com apenas um dispositivo operando no 802.11n enquanto os demais aplicaram o novo protocolo. As estações enviaram tráfego prioritário, destacando os problemas de janelas pequenas que ocorrem com este tipo de tráfego, descritos na seção anterior. Os resultados foram comparados com uma linha-base, equivalente a todos os dispositivos operando no modo legado. Desta forma, mediu-se o quanto o legado influencia a performance das soluções empregadas nos novos dispositivos. Os resultados mostram que algumas propostas resultam em perdas e interferências quando o canal é compartilhado com nós operando no antigo padrão. Por outro lado, algumas adaptam-se melhor ao ambiente heterogêneo, como detalha-se a seguir.

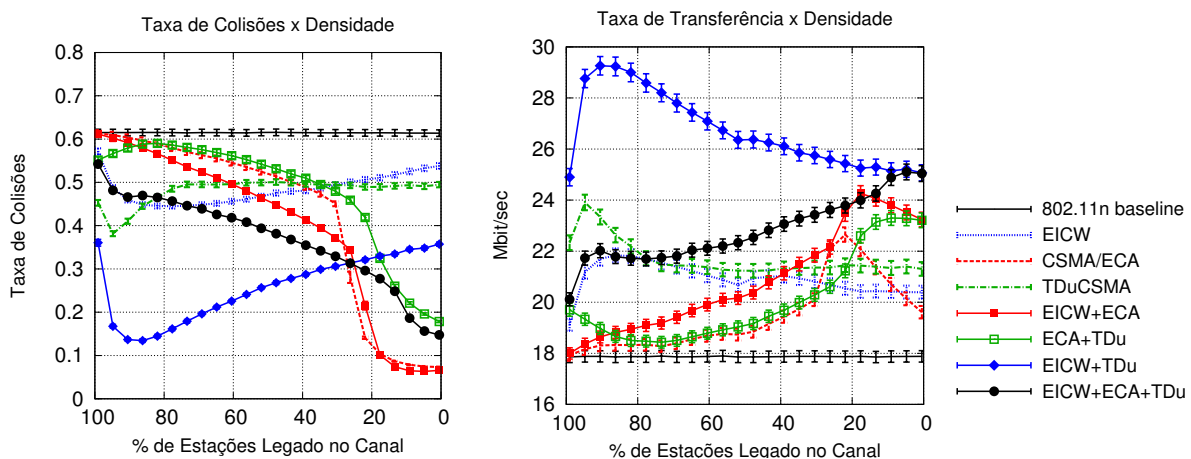


Figura 6.13: Taxas de colisões e de transferência medidas sob influência de dispositivos legado

A taxa de colisões, exibida à esquerda da Figura 6.13, mostra que as soluções que aplicam o **CSMA/ECA** alcançam o seu melhor desempenho quando não há dispositivos legado operando no canal. Neste caso, há uma queda brusca na redução das colisões com apenas alguns nós legados interferindo, entre 10% e 20%. Já o **TDuCSMA** e o **EICW** alcançam seus melhores desempenhos quando há poucas estações priorizadas e maior proporção de dispositivos legado. No caso do **EICW**, há mais equilíbrio na proporção de dispositivos legados e novos em relação ao melhor desempenho. Isto corrobora os resultados obtidos com o cenário misto avaliado na Seção 6.1 e reforça a proposta feita na Seção 6.1.1, em que a utilização do protocolo foi restringida e, com isto, alcançou maiores taxas de transferência. Além do mais, ao avaliar a vazão, percebe-se que a combinação do **EICW** com o **TDuCSMA** alcança resultados ainda melhores quando há dispositivos legado no canal, como pode ser visto à direita da Figura 6.13. Nestes protocolos, não há o problema de estações legado escolherem algum *slot* reservado pelo *backoff* determinístico do **CSMA/ECA**, o que degrada a performance. Ademais, a sincronização do **TDuCSMA** depende apenas da presença desse recurso nos novos dispositivos, que deixam de sofrer a interferência do legado e obtêm mais *time frames* à medida que menos nós competem pelos intervalos de transmissão prioritária.

No entanto, a questão da priorização que cada estação obtém em seu intervalo de tempo no **TDuCSMA** reduz a equidade da rede, garantindo mais chance de acesso aos novos

dispositivos, como pode ser visto à esquerda na Figura 6.14. Quando aplicado apenas o **EICW**, as estações legado mantêm boas chances de acesso, mas se este protocolo for combinado com o mecanismo de divisão de tempo, elas são praticamente silenciadas quando em menor número no canal. Todavia, isto pode ser resolvido com a liberação de alguns *time frames* do **TDuCSMA**, que deixariam de ser alocados caso o ponto de acesso perceba estações operando no modo legado. Por último, na avaliação da latência, percebe-se um maior atraso ao combinar o **EICW** com o **TDuCSMA**, causado pelas reservas do canal, que acontecem em intervalos maiores nesta divisão de tempo. Entretanto, os ganhos na vazão são superiores ao atraso adicionado pela solução e podem ser considerados imperceptíveis pelo usuário, como exibido à direita da Figura 6.14.

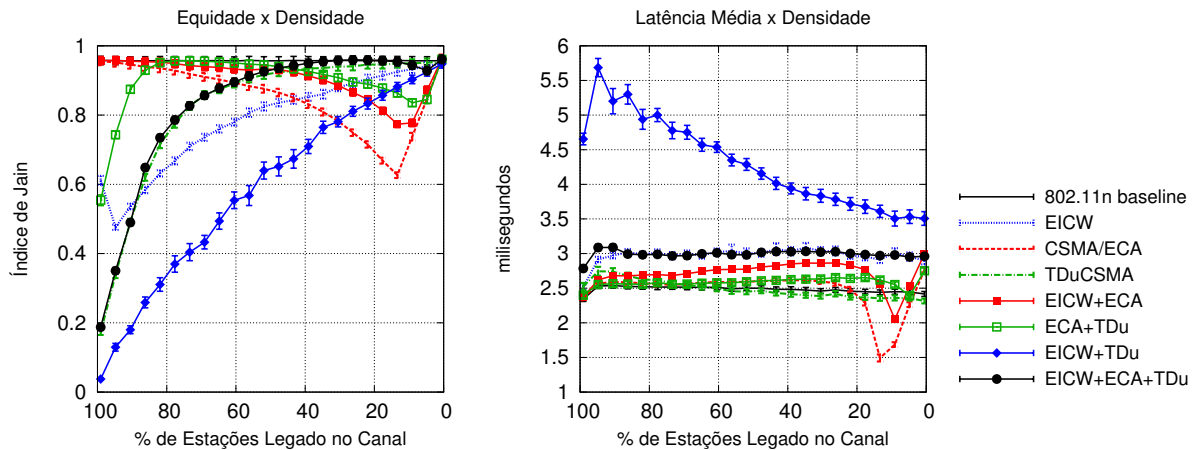


Figura 6.14: Latência e equidade das propostas sob influência de dispositivos legado

6.3 Resumo

Este capítulo apresentou os resultados de vários experimentos realizados através de simulações sobre as redes 802.11, com o objetivo de explorar e avaliar as soluções propostas para o problema das colisões nas redes densas, visando a emenda 802.11ax. Os resultados mostram que o *alargamento das janelas de contenção através do encurtamento dos slots* - **EICW** - é uma proposta viável, que pode ser melhorada com a inclusão de algum tipo de extensão limitando a quantidade de dispositivos concorrendo pelo canal. Dentre as opções analisadas, o método de *divisão de tempo* sugerido no protocolo **TDuCSMA** foi a solução que obteve os maiores ganhos de desempenho, verificados no aumento da vazão, quando combinado com o **EICW**.

Capítulo 7

Conclusão e Considerações Finais

Este trabalho foi desenvolvido com o propósito de avaliar soluções para o problema das colisões no mecanismo de acesso ao meio das redes 802.11, em ambientes densos. Inicialmente, foi realizada uma revisão dos conceitos e estruturas utilizados no atual padrão de redes locais sem fio, focada na camada de enlace e no processo de *backoff*, visando situar o leitor no enredo do estudo. Em seguida, o estado da arte foi apresentado e discutido, elencando-se os modelos que retratam o funcionamento do mecanismo e as suas principais propostas de aperfeiçoamento. Além do mais, foi proposto um novo modelo para estimar a probabilidade de colisões conforme a densidade da rede e o tamanho das janelas de contenção. Este material preparou e embasou as soluções apresentadas e avaliadas.

O método de *alargamento das janelas de contenção através do encurtamento dos slots - EICW* - foi detalhado e avaliado, assim como as proposições concorrentes baseadas em *backoff determinístico* e *divisão de tempo*, representadas pelos protocolos **CSMA/ECA** e **TDuCSMA**. Posteriormente, desenvolveu-se o planejamento dos experimentos para avaliação das soluções, definindo-se a metodologia e forma de implementação. Por fim, os resultados alcançados foram apresentados e discutidos em detalhes. Os efeitos e consequências de cada solução foram esmiuçados, partindo da análise do **EICW** e, mais tarde, dos demais protocolos. Extensões para ampliar o potencial das soluções foram apresentadas, avaliadas e confrontadas. A comparação entre as propostas permitiu identificar aquela que alcança os maiores ganhos em desempenho, resultante da **combinação entre o EICW e o TDuCSMA**.

A pesquisa atingiu os objetivos definidos na qualificação, seguindo o planejamento e o cronograma aprovados naquela ocasião. Três artigos foram escritos para apresentar os resultados parciais e submetidos para publicação. Destes, um foi publicado em simpósio nacional [Da Silva et al., 2016a] e outro em evento internacional [Da Silva et al., 2016b], enquanto o terceiro está em fase de revisão, após submissão em revista [Da Silva e Nogueira, 2016]. Indiretamente, o trabalho também foi utilizado em um estudo de caso, no contexto das redes pessoais, publicado em [Vergütz et al., 2017], onde parte da pesquisa e das ferramentas desenvolvidas neste projeto foi aproveitada para avaliar a priorização de tráfego em alertas médicos. Além do mais, o código-fonte das simulações implementadas foi disponibilizado em repositório de arquivos na Internet [Da Silva, 2016], permitindo a reprodução dos experimentos pela comunidade acadêmica. Acredita-se que estas contribuições tenham revelado importantes aspectos para a elaboração e a viabilização da próxima geração de redes locais sem fio.

7.1 Questões em Aberto

As conclusões apresentadas neste trabalho indicam que as mudanças propostas ao mecanismo de acesso das redes locais sem fio atingem o seu objetivo de mitigar colisões e aumentar a taxa de transferência agregada, podendo ter seus ganhos ampliados através de pequenas extensões. Contudo, apesar dos resultados positivos, a viabilidade da redução do *slot* deve ser alcançada pelo *hardware* antes que seja possível dispor deste recurso. O estudo das imperfeições no processo de verificação do canal e suas consequências é o próximo passo para confirmar a viabilidade de implementação do **EICW**, pois é necessário que o *hardware* consiga entregar detecções precisas em um intervalo de apenas $3,5\mu\text{s}$. Neste estudo, assumimos que o *hardware* consegue entregar medições do canal tão precisas quanto os atuais requisitos da norma, mesmo com um *slot* reduzido. O modelo proposto em [Ramachandran e Roy, 2007] busca avaliar os processos de verificação do canal e a influência das suas imperfeições, contudo em um contexto diferente, no caso as redes pessoais do padrão 802.15. Portanto, sugere-se que pesquisas sobre os mecanismos de acesso das redes sem fio do padrão 802.11 explorem esta lacuna em trabalhos futuros.

Adicionalmente, a implementação real da solução através de *kits* de Rádio Definidos por Software (SDR) como, por exemplo, através da plataforma **WARP** [Aryafar et al., 2013], podem avaliar minuciosamente estes mecanismos de acesso, com um nível de detalhes acima do alcançado pelos modelos que os representam. Logo, a observação de sua execução prática validaria os modelos e, espera-se, iria confirmar as conclusões até então obtidas. Além do mais, fatores adicionais, tais como diversos tipos de interferências externas e diferentes mecanismos de ajuste automático das taxas de transferência, poderiam ser inseridos no escopo para ampliar a confiabilidade da solução nos variados ambientes em que se pretende aplicá-la. Todavia, espera-se que as conclusões obtidas neste estudo possam fundamentar as próximas pesquisas, contribuindo com avanços na base de conhecimento sobre o tema na literatura.

Referências Bibliográficas

- [Aboul-Magd et al., 2014] Aboul-Magd, O., Merlin, S., Porat, R., Inoue, Y. e Stacy, R. (2014). Status of Project IEEE 802.11ax. http://www.ieee802.org/11/Reports/tgax_update.htm. Último Acesso: 16-06-2016.
- [Aboul-Magd et al., 2016] Aboul-Magd, O., Merlin, S., Porat, R., Inoue, Y. e Stacy, R. (2016). Status of Project IEEE 802.11ax. Relatório técnico, IEEE, TGax Update. URL: http://www.ieee802.org/11/Reports/tgax_update.htm Last access: 08/26/2016.
- [Abusubaih et al., 2013] Abusubaih, M. A., Najem Eddin, S. e Khamayseh, A. (2013). IEEE 802.11n Dual Band Access Points for Boosting the Performance of Heterogeneous WiFi Networks. Em *Proceedings of the 8th ACM workshop on Performance monitoring and measurement of heterogeneous wireless and wired networks*, páginas 1–4. ACM.
- [Adnan e Park, 2013] Adnan, M. e Park, E.-C. (2013). Assuring Per-Station Fairness in Multi-Rate WLANs: A Hybrid Approach of Contention Window Control and Frame Aggregation. Em *Proceedings of the Fifth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*, páginas 282–287. IEEE.
- [Afifi et al., 2016] Afifi, W., Abdel-Rahman, M. J., Krunz, M. e MacKenzie, A. B. (2016). Coexistence in Wireless Networks with Heterogeneous Self-Interference Cancellation Capabilities. *University of Arizona, Department of ECE, TR-UA-ECE-2016-1, Tech. Rep.*
- [Agilent Technologies, 2008] Agilent Technologies (2008). Advanced Design Systems Documentation. Disponível em [http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/ads2008/expmeas/ads2008/evm_wlan_ofdm\(\).html](http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/ads2008/expmeas/ads2008/evm_wlan_ofdm().html). Último acesso em 19/02/2017.
- [Alderfer, 2013] Alderfer, R. (2013). Wi-Fi Spectrum: Exhaust Looms. *Disponível em SSRN 2411645*. Disponível em <http://ssrn.com/abstract=2411645> Último Acesso: 27/12/2015.
- [Aryafar et al., 2013] Aryafar, E., Salonidis, T., Shi, J. e Knightly, E. (2013). Synchronized CSMA Contention: Model, Implementation, and Evaluation. *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, 21(5):1349–1362.
- [Baldo et al., 2010] Baldo, N., Requena-Esteso, M., Núñez-Martínez, J., Portolès-Comeras, M., Nin-Guerrero, J., Dini, P. e Mangues-Bafalluy, J. (2010). Validation of the IEEE 802.11 MAC model in the ns3 simulator using the EXTREME testbed. Em *Proceedings of the 3rd International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques*, página 64. ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering).
- [Bansal et al., 2016] Bansal, S., Chaudhary, H., Singh, P. e Singh, P. (2016). Socio-economic and Environmental Impact of Electronic Waste. *Integrated Research Advances*, 3(1):9–12.

- [Barcelo et al., 2009] Barcelo, J., Bellalta, B., Cano, C. e Oliver, M. (2009). Learning-BEB: Avoiding Collisions in WLAN. *Carrier Sense Multiple Access with Enhanced Collision Avoidance*, páginas 23–43.
- [Bellalta, 2016] Bellalta, B. (2016). IEEE 802.11ax: High-Efficiency WLANs. *IEEE Wireless Communications*, 23(1):38–46.
- [Bianchi, 2000] Bianchi, G. (2000). Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 18(3):535–547.
- [Bonnington, 2015] Bonnington, C. (2015). In Less Than Two Years, a Smartphone Could Be Your Only Computer. *Wired Magazine* - URL: <http://www.wired.com/2015/02/smartphone-only-computer/>. Último acesso em 30/12/2016.
- [Bononi et al., 2001] Bononi, L., Conti, M. e Donatiello, L. (2001). A Distributed Mechanism for Power Saving in IEEE 802.11 Wireless LANs. *Mobile Networks and Applications*, 6(3):211–222.
- [Chang et al., 2012] Chang, Z., Alanen, O., Huovinen, T., Nihtilä, T., Ong, E. H., Knecht, J. e Ristaniemi, T. (2012). Performance Analysis of IEEE 802.11ac DCF with Hidden Nodes. Em *Proceedings of the 75th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, páginas 1–5. IEEE.
- [Chatzimisios et al., 2002] Chatzimisios, P., Vitsas, V. e Boucouvalas, A. C. (2002). Throughput and Delay Analysis of IEEE 802.11 Protocol. Em *Proceedings of the 3rd International Workshop on System-on-Chip for Real-Time Applications*, páginas 168–174. IEEE.
- [Cheng et al., 2013] Cheng, M.-H., Hwang, W.-S., Lin, C.-H. e Su, H.-K. (2013). A Oneself Adjusts Backoff Mechanism for Channel Access in IEEE 802.11 DCF WLAN. Em *Proceedings of the Seventh International Conference on Complex, Intelligent, and Software Intensive Systems (CISIS)*, páginas 287–292. IEEE.
- [Choi et al., 2010] Choi, J. I., Jain, M., Srinivasan, K., Levis, P. e Katti, S. (2010). Achieving Single Channel, Full Duplex Wireless Communication. Em *Proceedings of the Sixteenth Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, páginas 1–12. ACM.
- [Chun et al., 2013] Chun, J., Lee, W., Choi, J., Lim, D. e Cho, H. (2013). Legacy Support on HEW Frame Structure. Relatório técnico, IEEE, doc: IEEE 802.11-13/1057r0.
- [Chun et al., 2012] Chun, S., Xianhua, D., Pingyuan, L. e Han, Z. (2012). Adaptive Access Mechanism with Optimal Contention Window based on Node Number Estimation using Multiple Thresholds. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 11(6):2046–2055.
- [Cisco, 2014] Cisco, C. V. N. (2014). Global Mobile Data Traffic Forecast Update 2014–2019. White Paper c11-520862. Disponível em http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white_paper_c11-520862.pdf. Último acesso em 27/12/2015.
- [Da Silva, 2016] Da Silva, R. A. (2016). Projeto EICW. Disponível no Repositório Dropbox em <https://www.dropbox.com/sh/htmv3buniftddg4/AABzVseribdrP1B9KdSIPp4ya?dl=0>. Último acesso em 22/02/2017.

- [Da Silva et al., 2016a] Da Silva, R. A., Dos Santos, A. e Nogueira, M. (2016a). Reduzindo a Probabilidade de Colisões através do Encurtamento dos Slots em Redes 802.11. Em *Anais do Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC) 2016 (Trilha Principal e Salão de Ferramentas)*, Salvador, Bahia.
- [Da Silva e Nogueira, 2016] Da Silva, R. A. e Nogueira, M. (2016). MAC Protocols for IEEE 802.11ax: Avoiding Collisions on Dense Networks. Submetido à IEEE Wireless Comm, arXiv:submit/1728684 de 20/11/2016.
- [Da Silva et al., 2016b] Da Silva, R. A., Santos, A., Nogueira, M., Boussetta, K. e Achir, N. (2016b). Avoiding Collisions by Time Slot Reduction Supporting Voice and Video in 802.11 Networks. Em *Proceedings of the Global Communications Conference (GLOBECOM)*, páginas 1–6. IEEE.
- [Dai e Sun, 2013] Dai, L. e Sun, X. (2013). A Unified Analysis of IEEE 802.11 DCF Networks: Stability, Throughput, and Delay. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 12(8):1558–1572.
- [Daneshgaran et al., 2008] Daneshgaran, F., Laddomada, M., Mesiti, F. e Mondin, M. (2008). Unsaturated Throughput Analysis of IEEE 802.11 in Presence of non Ideal Transmission Channel and Capture Effects. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 7(4):1276–1286.
- [Deng et al., 2014] Deng, D.-J., Chen, K.-C. e Cheng, R.-S. (2014). IEEE 802.11ax: Next Generation Wireless Local Area Networks. Em *Proceedings of the 10th International Conference on Heterogeneous Networking for Quality, Reliability, Security and Robustness (QShine)*, páginas 77–82. IEEE.
- [Divgi e Chlebus, 2013] Divgi, G. e Chlebus, E. (2013). Characterization of User Activity and Traffic in a Commercial Nationwide Wi-Fi Hotspot Network: Global and Individual Metrics. *Wireless Networks*, 19(7):1783–1805.
- [Du et al., 2011] Du, S., Yim, S., Lu, X. e Varadarajan, B. (2011). Randomization Management For Carrier Sensing Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA-CA). US Patent App. 13/009,028.
- [Duda et al., 2008] Duda, A. et al. (2008). Understanding the Performance of 802.11 Networks. Em *Proceedings of the 19th Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, volume 8.
- [Fall e Stevens, 2011] Fall, K. R. e Stevens, W. R. (2011). *TCP/IP Illustrated, volume 1: The Protocols*. Addison-Wesley.
- [Fang et al., 2013] Fang, M., Malone, D., Duffy, K. R. e Leith, D. J. (2013). Decentralised Learning MACs for Collision-free Access in WLANs. *Wireless networks*, 19(1):83–98.
- [Figueroa e Paolini, 2006] Figueroa, E. e Paolini, M. (2006). Wi-Fi Certified™ Makes it Wi-Fi - An Overview of the Wi-Fi Alliance Approach to Certification. Relatório técnico, Wi-Fi Alliance.
- [Gast, 2013] Gast, M. S. (2013). *802.11ac: a Survival Guide*. "O'Reilly Media, Inc."
- [Geier, 2010] Geier, J. (2010). *Designing and Deploying 802.11n Wireless Networks*. Pearson Education.

- [Gottapu et al., 2013] Gottapu, S. B. R., Tatineni, M. e Kumar, M. (2013). Performance Analysis of Collision Alleviating Distributed Coordination Function Protocol in Congested Wireless Networks - A Markov Chain Analysis. *IET Networks*, 2(4):204–213.
- [Gupta et al., 2012] Gupta, A., Min, J. e Rhee, I. (2012). WiFox: Scaling WiFi Performance for Large Audience Environments. Em *Proceedings of the 8th international conference on Emerging networking experiments and technologies*, páginas 217–228. ACM.
- [Hajlaoui et al., 2013] Hajlaoui, N., Jabri, I. e Jemaa, M. B. (2013). Experimental Performance Evaluation and Frame Aggregation Enhancement in IEEE 802.11n WLANs. *International Journal of Communication Networks and Information Security*, 5(1):48–58.
- [Harjula et al., 2011] Harjula, I., Pinola, J. e Prokkola, J. (2011). Performance of IEEE 802.11 Based WLAN Devices Under Various Jamming Signals. Em *Proceedings of the Military Communications Conference (MILCOM)*, páginas 2129–2135. IEEE.
- [He et al., 2013] He, Y., Sun, J., Ma, X., Vasilakos, A. V., Yuan, R. e Gong, W. (2013). Semi-Random Backoff: Towards Resource Reservation for Channel Access in Wireless LANs. *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, 21(1):204–217.
- [Helland, 2010] Helland, I. S. (2010). *Steps Towards a Unified Basis for Scientific Models and Methods*. World Scientific.
- [Hiertz et al., 2015] Hiertz, G., Mestanov, F. e Coffey, S. (2015). Enlarged Minimal Contention Window Size. Relatório técnico, IEEE, doc: IEEE 802.11-15/0914r1. Disponível em <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/15/11-15-0914-01-00ax-enlarged-minimal-contention-window-size.pptx> Último Acesso: 27/12/2015.
- [Hong et al., 2012] Hong, K., Lee, S., Kim, K. e Kim, Y. (2012). Channel Condition Based Contention Window Adaptation in IEEE 802.11 WLANs. *IEEE Transactions on Communications*, 60(2):469–478.
- [Hsu e Hsieh, 2013] Hsu, M. C.-W. e Hsieh, T.-Y. (2013). A Probability Based MAC Channel Congestion Control Mechanism for VANET. Em *Proceedings of the 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, páginas 1–5. IEEE.
- [Huang et al., 2014] Huang, J., Xing, G. e Zhou, G. (2014). Unleashing Exposed Terminals in Enterprise WLANs: A Rate Adaptation Approach. Em *Proceedings of the IEEE INFOCOM*, páginas 2481–2489. IEEE.
- [IEEE, 2012] IEEE (2012). 802.11-2012 - IEEE Standard for Information Technology–Telecommunications and Information Exchange Between Systems Local and Metropolitan Area Networks–Specific Requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. Relatório Técnico IEEE Std 802.11-2012, IEEE-Inst.
- [Jain et al., 2011] Jain, M., Choi, J. I., Kim, T., Bharadia, D., Seth, S., Srinivasan, K., Levis, P., Katti, S. e Sinha, P. (2011). Practical, Real-time, Full Duplex Wireless. Em *Proceedings of the 17th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, páginas 301–312. ACM.
- [Jain et al., 1999] Jain, R., Duresi, A. e Babic, G. (1999). Throughput Fairness Index: An Explanation. Relatório técnico, Department of CIS, The Ohio State University.

- [Jamil et al., 2014] Jamil, I., Cariou, L. e Helard, J.-F. (2014). Improving the Capacity of Future IEEE 802.11 High Efficiency WLANs. Em *Proceedings of the 21st International Conference on Telecommunications (ICT)*, páginas 303–307. IEEE.
- [Ji et al., 2014] Ji, B., Song, K., Hu, Y. e Chen, H. (2014). Cooperative Transmission Mechanisms in Next Generation WiFi: IEEE 802.11ac. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2014.
- [Kang et al., 2010] Kang, S.-W., Cha, J.-R. e Kim, J.-H. (2010). A Novel Estimation-Based Backoff Algorithm in the IEEE 802.11 Based Wireless Network. Em *Proceedings of the 7th IEEE Consumer Communications and Networking Conference*, páginas 1–5. IEEE.
- [Kosek-Szott, 2012] Kosek-Szott, K. (2012). A Survey of MAC Layer Solutions to the Hidden Node Problem in Ad-Hoc Networks. *Ad Hoc Networks*, 10(3):635–660.
- [Kritzinger et al., 2010] Kritzinger, P. S., Msiska, H., Mundangepfupfu, T., Pileggi, P. e Symington, A. (2010). Comparing the Results from Various Performance Models of IEEE 802.11g DCF. *Computer Networks*, 54(10):1672–1682.
- [Kumar et al., 2008] Kumar, A., Manjunath, D. e Kuri, J. (2008). *Wireless Networking*. Morgan Kaufmann.
- [Kurose e Ross, 2010] Kurose, J. e Ross, K. (2010). *Computer Networking: A Top Down Approach, 2010*. Addison-Wesley.
- [Laghari et al., 2011] Laghari, K., Crespi, N., Molina, B. e Palau, C. E. (2011). QoE Aware Service Delivery in Distributed Environment. Em *Proceedings of the IEEE Workshops of International Conference on Advanced Information Networking and Applications*, páginas 837–842.
- [Lansford et al., 2013] Lansford, J., Sicker, D., Reed, D. e Baker, K. (2013). Coexistence and Optimization of Wireless LAN: Time, Frequency, Space, Power, and Load. Relatório técnico, IEEE, doc: IEEE 802.11-13/0558r1. Disponível em <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/13/11-13-0558-01-0hew-coex-and-optimization-of-wlan-time-frequency-space-power-load.pptx>. Último acesso em 16/06/16.
- [Lee e Walrand, 2008] Lee, J. e Walrand, J. C. (2008). Design and Analysis of an Asynchronous Zero Collision MAC Protocol. *arXiv preprint arXiv:0806.3542*.
- [Malone et al., 2007] Malone, D., Duffy, K. e Leith, D. (2007). Modeling the 802.11 Distributed Coordination Function in Nonsaturated Heterogeneous Conditions. *IEEE/ACM Transactions on networking*, 15(1):159–172.
- [Merlin et al., 2014] Merlin, S., Barriac, G., Sampath, H., Cariou, L., Derham, T. e Rouzic, J.-P. (2014). TGax Simulation Scenarios. Relatório técnico, IEEE, doc: IEEE 802.11-14/0980r14.
- [Moraes et al., 2008] Moraes, R., Portugal, P., Vasques, F. e Fonseca, J. A. (2008). Limitations of the IEEE 802.11 e EDCA Protocol when Supporting Real-time Communication. Em *Proceedings of the IEEE International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS)*, páginas 119–128. IEEE.
- [Nahrstedt, 2011] Nahrstedt, K. (2011). Quality of Service in Wireless Networks over Unlicensed Spectrum. *Synthesis Lectures on Mobile and Pervasive Computing*, 6(1):1–176.

- [Natkaniec et al., 2013] Natkaniec, M., Kosek-Szott, K., Szott, S. e Bianchi, G. (2013). A Survey of Medium Access Mechanisms for Providing QoS in ad-hoc Networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 15(2):592–620.
- [Nishimura et al., 2015] Nishimura, H., Fujiwara, R., Miyazaki, M. e Katagishi, M. (2015). Access Point Cooperation for Collision-free Polling Between Distributed Real-time Networks. Em *Proceedings of the 26th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, páginas 1057–1061. IEEE.
- [NS-3 Consortium, 2011] NS-3 Consortium (2011). ns-3 a Discrete-event Network Simulator for Internet System. Disponível em <https://www.nsnam.org>. Último acesso em 16/06/2016.
- [Patro et al., 2013] Patro, A., Govindan, S. e Banerjee, S. (2013). Observing Home Wireless Experience Through WiFi APs. Em *Proceedings of the 19th Annual International Conference on Mobile Computing & Networking*, páginas 339–350. ACM.
- [Perez, 1998] Perez, R. (1998). *Wireless Communications Design Handbook: Interference into Circuits: Aspects of Noise, Interference, and Environmental Concerns*. Academic Press.
- [Podolanko et al., 2014] Podolanko, J., Datta, S. e Das, S. K. (2014). Performance Analysis of Real-time Traffic over 802.11n Wireless Local Area Networks: An Experimental Study. Em *Proceedings of the 10th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, páginas 453–457.
- [Pries et al., 2008] Pries, R., Menth, S., Staehle, D., Menth, M. e Tran-Gia, P. (2008). Dynamic Contention Window Adaptation (DCWA) in IEEE 802.11e Wireless Local Area Networks. Em *Proceedings of the Second International Conference on Communications and Electronics (ICCE)*, páginas 92–97. IEEE.
- [Primiani et al., 2010] Primiani, V. M., Moglie, F. e Recanatini, R. (2010). On the Use of a Reverberation Chamber to Test the Performance and the Immunity of a WLAN System. Em *Proceedings of the International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC)*, páginas 668–673. IEEE.
- [Rahul et al., 2009] Rahul, H., Edalat, F., Katabi, D. e Sodini, C. G. (2009). Frequency-aware Rate Adaptation and MAC Protocols. Em *Proceedings of the 15th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, páginas 193–204. ACM.
- [Ramachandran e Roy, 2005] Ramachandran, I. e Roy, S. (2005). Analysis of Throughput and Energy Efficiency of p-Persistent CSMA with Imperfect Carrier Sensing. Em *Proceedings of the Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)*, volume 6, páginas 5–pp–3432. IEEE.
- [Ramachandran e Roy, 2007] Ramachandran, I. e Roy, S. (2007). Clear Channel Assessment in Energyconstrained Wideband Wireless Networks. *IEEE Wireless Communications*, 14(3):70–78.
- [Ramakrishnan e Yang, 1994] Ramakrishnan, K. K. e Yang, H. (1994). The Ethernet Capture Effect: Analysis and Solution. Em *Proceedings of the Conference on Local Computer Networks*, páginas 228–240. IEEE.

- [Rubinstein et al., 2007] Rubinstein, M. G., Costa, L. H. M. K., Campista, M. E. M., de Oliveira Cunha, D., Amodei Jr, A., Velloso, P. B. e Duarte, O. C. M. (2007). Analysis of MAC Protocols for Home Networks. *Journal of Communication and Information Systems*, 22(1):10–23.
- [Sanabria et al., 2014a] Sanabria, L., Barcelo, J., Bellalta, B. e Gringoli, F. (2014a). A High Efficiency MAC Protocol for WLANs: Providing Fairness in Dense Scenarios. *arXiv preprint arXiv:1412.1395*.
- [Sanabria et al., 2014b] Sanabria, L., Barcelo, J., Faridi, A. e Bellalta, B. (2014b). WLANs throughput improvement with CSMA/ECA. Em *Proceedings of the Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, páginas 125–126. IEEE.
- [Sanabria et al., 2016] Sanabria, L., Bellalta, B., Facchi, N. e Gringoli, F. (2016). Collision-free Operation in High Density WLAN Deployments. *arXiv preprint arXiv:1607.08138*.
- [Scholz, 2015] Scholz, M. (2015). Node Similarity as a Basic Principle behind Connectivity in Complex Networks. *Journal of Data Mining and Digital Humanities*, 2015.
- [Sen et al., 2010] Sen, S., Roy Choudhury, R. e Nelakuditi, S. (2010). CSMA/CN: Carrier Sense Multiple Access with Collision Notification. Em *Proceedings of the Sixteenth Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, páginas 25–36. ACM.
- [Sen et al., 2011] Sen, S., Roy Choudhury, R. e Nelakuditi, S. (2011). No Time to Countdown: Migrating Backoff to the Frequency Domain. Em *Proceedings of the Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, páginas 241–252. ACM.
- [Shao et al., 2013] Shao, H.-R., Ngo, C., Tong, F. e Chang, S. (2013). The Definition of Performance Metrics for HEW. Relatório técnico, IEEE, doc: IEEE 802.11-13/1137r02.
- [Shih e Lin, 2004] Shih, D.-H. e Lin, Z.-Q. (2004). Bandwidth Saturation QoS Provisioning for Adaptive Multimedia in Wireless/Mobile Networks. *Computer Standards & Interfaces*, 26(4):279–288.
- [Sikdar, 2007] Sikdar, B. (2007). An Analytic Model for the Delay in IEEE 802.11 PCF MAC-based Wireless Networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 6(4).
- [Song et al., 2003] Song, N.-O., Kwak, B.-J., Song, J. e Miller, L. E. (2003). Enhancement of IEEE 802.11 Distributed Coordination Function with Exponential Increase Exponential Decrease Backoff Algorithm. Em *Proceedings of the IEEE Semiannual Vehicular Technology Conference. VTC 2003-Spring.*, volume 4, páginas 2775–2778. IEEE.
- [Stephens, 2016] Stephens, A. (2016). Quick Guide to IEEE 802.11 Activities. http://www.ieee802.org/11/QuickGuide_IEEE_802_WG_and_Activities.htm. Último acesso em: 06-07-2016.
- [Tang e Wang, 2015] Tang, A. e Wang, X. (2015). A-Duplex: Medium Access Control for Efficient Coexistence Between Full-Duplex and Half-Duplex Communications. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 14(10):5871–5885.
- [Tarasyuk et al., 2014] Tarasyuk, O., Gorbenko, A., Kharchenko, V. e Hollstein, T. (2014). Contention Window Adaptation to Ensure Airtime Consumption Fairness in Multirate Wi-Fi Networks. Em *Proceedings of the International Conference on Digital Technologies (DT)*, páginas 344–349. IEEE.

- [Tsao e Huang, 2011] Tsao, S.-L. e Huang, C.-H. (2011). A Survey of Energy Efficient MAC Protocols for IEEE 802.11 WLAN. *Computer Communications*, 34(1):54–67.
- [Uchimura et al., 2010] Uchimura, Y., Nasu, T. e Takahashi, M. (2010). IEEE 802.11-Based Wireless Sensor System for Vibration Measurement. *Advances in Civil Engineering*, 2010.
- [Vergütz et al., 2017] Vergütz, A., Da Silva, R. A., Vieira, A. B. e Nogueira, M. (2017). Um Sistema de Identificação e Transmissão Prioritária de Alertas Médicos sobre WBAN e WLAN. Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC) 2017.
- [Vesco e Scopigno, 2009] Vesco, A. e Scopigno, R. (2009). Time-division Access Priority in CSMA/CA. Em *Proceedings of the 20th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, páginas 2162–2166. IEEE.
- [Vesco et al., 2014] Vesco, A., Scopigno, R. M. e Masala, E. (2014). Supporting Triple-play Communications with TDuCSMA and First Experiments. Em *Proceedings of the Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, páginas 3260–3265. IEEE.
- [Vesco et al., 2015] Vesco, A., Scopigno, R. M. e Masala, E. (2015). TDuCSMA: Efficient Support for Triple-play Services in Wireless Home Networks. Em *Proceedings of the 27th International Conference on Communications (ICC)*, páginas 6941–6947. IEEE.
- [Vesco et al., 2012] Vesco, A., Toso, G. M. e Scopigno, R. (2012). Prototyping of Time-division Unbalanced Carrier Sense Multiple Access and First Experiments. Em *Proceedings of the Global Communications Conference (GLOBECOM)*, páginas 5500–5505. IEEE.
- [Wang, 2012] Wang, C. (2012). Achieving Per-Flow and Weighted Fairness for Uplink and Downlink in IEEE 802.11 WLANs. *EURASIP Journal on Wireless Communication and Networking*, 2012(1):1–9.
- [Williams e Kelley, 1986] Williams, T. e Kelley, C. (1986). Gnuplot Homepage. Disponível em <http://www.gnuplot.info/>. Último acesso em 24/01/2017.
- [Xie e Zhang, 2014] Xie, X. e Zhang, X. (2014). Does Full-duplex Double the Capacity of Wireless Networks? Em *Proceedings of the Conference on Computer Communications - INFOCOM*, páginas 253–261.
- [Zanella e De Pellegrini, 2004] Zanella, A. e De Pellegrini, F. (2004). Mathematical Analysis of IEEE 802.11 Energy Efficiency. Em *Proceedings of the 7th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC)*, páginas 1–5. Citeseer.
- [Zhang et al., 2011] Zhang, H., Zhang, X. e Chen, G. (2011). Performance Analysis of IEEE802.11 DCF in non-Saturated Conditions. Em *Proceedings of the International Conference on Business Management and Electronic Information (BMEI)*, volume 4, páginas 495–498. IEEE.
- [Ziouva e Antonakopoulos, 2002] Ziouva, E. e Antonakopoulos, T. (2002). CSMA/CA Performance under High Traffic Conditions: Throughput and Delay Analysis. *Computer Communications*, 25(3):313–321.

Apêndice A

Protocolo CSMA/ECA

Neste apêndice apresenta-se uma breve descrição do processo para obter e validar o código utilizado para simular o protocolo CSMA/ECA, permitindo assim compará-lo com as demais soluções nos experimentos desta pesquisa.

A.1 Validação

Dentre os protocolos de acesso ao meio baseados em *backoff* determinístico, descritos na Seção 3.3.2, um dos mais avaliados em pesquisas disponíveis na literatura é o **CSMA/ECA**. Em [Sanabria et al., 2016], os seus autores disponibilizaram gratuitamente o código-fonte da simulação utilizada para avaliar o protocolo e encorajaram outros pesquisadores a desenvolverem mais testes para aprenderem a partir da experiência que eles tiveram. Oportunamente, visando comparar os resultados deste protocolo com as demais soluções avaliadas nesta pesquisa, este projeto foi incorporado nas simulações e os seus resultados foram comparados na Seção 6.

Todavia, antes de considerar novos dados de simulação, os *scripts* dos experimentos originais foram configurados no ambiente usado nesta pesquisa e processados com os mesmos parâmetros publicados, para validação. Os resultados alcançados foram os esperados, desprezando-se a margem de erro, confirmando a configuração do ambiente e a conformidade com o trabalho original. A vazão e a taxa de falhas de transmissão foram medidas em diferentes densidades conforme indicado na Figura A.1. Os autores compararam o mecanismo atual do 802.11n com duas propostas do **CSMA/ECA**, sendo que uma delas aplicou um mecanismo de ajuste dinâmico do tamanho das janelas, denominado *Hysteresis*. Por ter apresentado os melhores resultados, esta opção foi a utilizada nos demais experimentos desta pesquisa, na comparação dos protocolos.

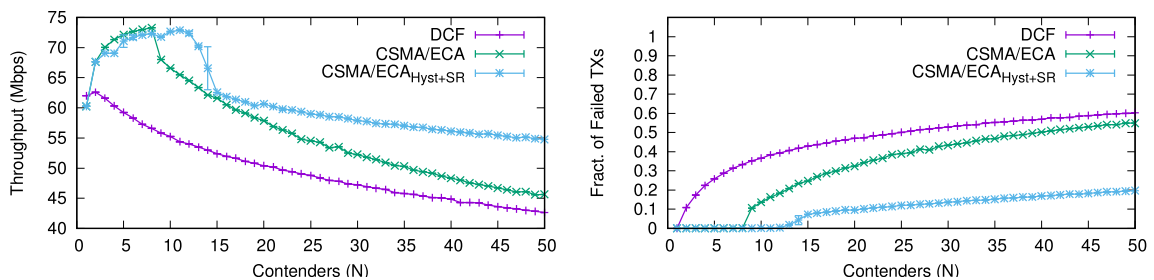


Figura A.1: Dados do Experimento Original em [Sanabria et al., 2016]

A.2 Implementação

Após descarregar e estudar o código, verificou-se que o projeto efetuava modificações em cinco classes responsáveis pelo gerenciamento das filas na camada de enlace (`wifi-mac-queue`, `dca-txop`, `mac-low`, `block-ack-manager` e `edca-txop-n`), além de três classes responsáveis por operações da camada física (`wifi-channel`, `yans-wifi-phy` e `yans-wifi-channel`). Portanto, as classes `yans-wifi-phy` e `wifi-mac-queue` foram mescladas ao projeto de simulação feito para avaliar o **EICW**, com o objetivo de preservar o detector de colisões e os contadores da classe de estatísticas (Seção 5.2). E as demais classes foram aplicadas sem alterações, mantendo o formato original disponibilizado pelos autores. Observou-se que o código original utiliza-se de três funções ativadas por eventos do simulador. Das quais, a função `channelSetup` configura os nós, definindo o alcance e os demais parâmetros. A função `finishSetup` aplica as modificações que ativam o **CSMA/ECA** e parametriza-o. E a função `finalResults` apresenta os dados coletados pelos rastreadores criados para monitorar o processo. Por fim, a validação foi efetuada através do *script* `eca-multiple-ap`.

Posteriormente, este ambiente foi empregado nos cenários que haviam sido utilizados na avaliação do **EICW**, alterando o perfil do tráfego, o posicionamento dos nós e os parâmetros de modulação e codificação, para que todos os nós utilizassem o mesmo canal e estivessem dentro do alcance. Todavia, os parâmetros de processamento específicos do protocolo **CSMA/ECA** foram mantidos com as mesmas condições do experimento original, em todas as situações em que foi avaliado. Estando sob os mesmos cenários, as simulações foram processadas e os resultados comparados conforme descritos na Seção 6.

Apêndice B

Protocolo TDuCSMA

Neste apêndice apresenta-se uma breve descrição da implementação do protocolo TDuCSMA no simulador **ns3**, permitindo assim compará-lo com as demais soluções nos experimentos desta pesquisa.

B.1 Preparação

Como descrito na Seção 6.1, os resultados da avaliação sobre o **EICW** mostraram que a solução alcança melhor desempenho quando há diversidade no perfil de tráfego, ou seja, quando há maior variação no tamanho das janelas entre os dispositivos buscando transmitir. Portanto, dentre as soluções que empregam **adaptação dinâmica da janela de contenção**, descritas na Seção 3.3.3, o protocolo **TDuCSMA** foi selecionado por promover esta diversidade, através da alteração dos tamanhos das janela de cada dispositivo em intervalos de tempo determinados.

O protocolo foi implementado parcialmente no simulador **ns3**, conforme descrito pelos autores em [Vesco et al., 2012], porém com um e somente um *time frame* constantemente alocado para cada estação e um *time cycle* com *k time frames*, onde *k* corresponde ao número de estações no canal, assegurando assim a mesma prioridade para todas as estações do canal. Como a alocação dos intervalos foi pré-definida e constante, dispensou-se a parte do protocolo voltada para negociação de quantos *time frames* seriam alocados para cada estação. Com isto, cada estação passou a operar com um *time frame* ajustado em 10ms a cada ciclo, no qual seus quadros foram transmitidos sem contenção, com sua janela reduzida ao tamanho mínimo ($EDCA^H$), ajustado em apenas um *slot*. O Algoritmo 2 detalha como este processo foi implementado no **ns3**, alternando a estação priorizada a cada *time frame*.

Algoritmo 2: CONFIGURATDuCSMA

Entrada: *indiceSTA*, *arraySTA*, *TimeFrame*

```

1 início
2   proximaSTA ← 0
3   se indiceSTA < (arraySTA.tamanho - 1) então
4     | proximaSTA ← indiceSTA + 1
5   fim
6   AJUSTAJANELA(arraySTA[indiceSTA],  $EDCA^L$ )
7   AJUSTAJANELA(arraySTA[proximaSTA],  $EDCA^H$ )
8   Simulador.AGENDEEVENTO(Segundos(TimeFrame), ConfiguraTDuCSMA,
9     | proximaSTA, arraySTA, TimeFrame)
10 fim

```

B.2 Validação

O protocolo **TDuCSMA** foi originalmente concebido para priorização de tráfego e os seus autores destacam sua capacidade de distribuir fluxos de dados conforme suas reservas de banda, sem que isso resulte em aumento de latência. Porém, nas simulações feitas com o **ns2**, reproduzindo um cenário de redes domésticas com dez dispositivos e doze fluxos de dados, percebe-se um aumento de vazão superior a 30% em relação ao DCF, que cresce à medida que o canal fica mais saturado [Vesco et al., 2015]. Já nos experimentos, realizados com apenas três estações, o aumento médio da vazão ficou próximo de 6% [Vesco et al., 2014], o que condiz com os estudos que afirmam que os simuladores são otimistas em relação à realidade, abordados na Seção 3.2. Entretanto, em ambos os casos, quando o canal não está saturado, este acréscimo na taxa de transferência foi menos expressivo ou inexistente. Ademais, os autores alegaram que a menor probabilidade de colisões obtida com o **TDuCSMA** justifica os aumentos de vazão no cenário saturado [Vesco et al., 2012].

Contudo, conjectura-se que, por causa do seu foco na priorização do tráfego, os autores apresentaram apenas as variações médias na vazão, obtidas com diversos tipos de tráfego em diferentes contextos, o que dificulta reproduzir e aferir exatamente os mesmos resultados, na mesma situação. Todavia, após implementado o protocolo **TDuCSMA** no **ns3** e visando validá-lo, reproduziu-se um cenário com cada nó enviando um fluxo de 4Mbps, aumentando gradativamente a quantidade de nós até saturar o canal, procurando comparar a vazão obtida com a **DCF** e o **TDuCSMA**. Os resultados, exibidos na Figura B.1, mostram que a vazão é praticamente a mesma enquanto o canal não está saturado, até que a **DCF** começa a exibir sinais de esgotamento, próximo de 25Mbps, enquanto o **TDuCSMA** alcança 35Mbps, decorrendo uma diferença aproximada de 12% quando o canal está saturado, conciliando com uma escala intermediária entre o que foi obtido nas simulações com **ns2** e com os experimentos. Além do mais, a medição das colisões condiz com a justificativa dos autores para o aumento da vazão.

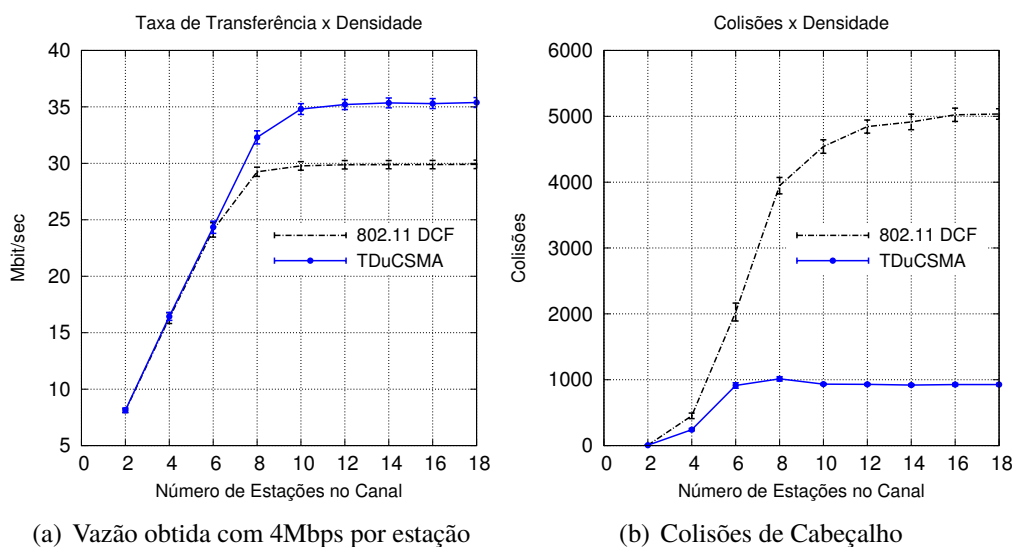


Figura B.1: Comparação da 802.11 **DCF** com o **TDuCSMA**